



**Aristóteles Quirino Ginga Lambuazau**

Licenciado em Engenharia Eletromecânica

## **Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos da Província de Luanda (ASM) por Diferentes Modelos Técnicos de Previsão**

Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em  
Engenharia de Energia Renováveis

Orienta- Prof. Doutora Maria Margarida Boavida Pontes Gonçalves Profes-  
dor: sora Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina – FCT/UNL

Arguente: Prof. Doutor Ronney Arismel Mancebo Boloy – CEFET/RJ

Vogal: Prof. Doutora Maria Margarida Boavida Pontes Gonçalves – FCT/UNL

**junho, 2021**



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA





## **Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos da Província de Luanda (ASM) por Diferentes Modelos Técnicos de Previsão**

Copyright © Aristóteles Quirino Ginga Lambuazau, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos, reproduzidos em papel, de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

### **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha esposa (Analtina Lambuazau) e ao meu filho (Aires Lambuazau), por serem o meu cajado em momentos tão difíceis da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus meu guia e protetor, por me proporcionar o dom da vida e me conceder a oportunidade de realização do meu mestrado. À minha orientadora Professora Doutora Margarida Boavida Pontes Gonçalves, pela incansável orientação, disponibilidade, motivação e confiança apesar do ano tão atípico que temos vivido.

Aos meus companheiros de combate do MEER, que me acolheram e deram suporte em cada dificuldade com que nos deparávamos, podendo estreitar laços que levarei para vida.

À minha família concretamente a minha esposa e o meu filho pela cumplicidade e motivação durante o período de realização da dissertação.

Aos meus pais, por todo apoio e carinho ao longo destes anos. Obrigado por tudo.

## RESUMO

O aproveitamento de biogás de aterro pode possibilitar uma mudança sustentável, o que desperta a atenção de muitos países interessados na diversificação da matriz energética. Assim sendo, um grande problema que atualmente Angola enfrenta é a crise económica devido a dependência dos recursos energéticos fósseis, como o petróleo e o gás natural, o que torna imperativo fazer a diversificação energética preferencialmente incluindo fontes renováveis.

Atendendo ao disposto, o presente trabalho tem como objetivo estimar teoricamente o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos da província de Luanda, considerando concretamente os resíduos depositos nos últimos 8 anos, no aterro sanitário dos Mulenvos, que por sinal é o único existente no país. O trabalho foi organizado em 6 capítulos fundamentais para a sua realização.

Para avaliar o potencial energético do aterro sanitário dos Mulenvos de forma precisa, utilizaram-se dois modelos de previsão de biogás de aterros sanitário: o modelo LandGEM e o modelo IPCC. Estes dois modelos foram utilizados como ferramentas de extrema importância para suportar um estudo de viabilidade. Por conseguinte fez-se um estudo comparativo da produção de caudal de metano recuperado do aterro e estimou-se o potencial de energia elétrica produzido a partir deste gás. Da análise realizada concluiu-se que o potencial energético dos RSUs de Luanda apresentou bons resultados, destacando-se, o modelo IPCC v.2006 por nele se obter valor máximo de caudal de metano captado de 823 482 436,51 m<sup>3</sup>/ano relativamente ao ano 2020 e uma potência elétrica de 249,15 MW, superior ao modelo LandGEM v.3.02.

Os resultados obtidos permitem avaliar o desperdício de um recurso energético, que vem sendo feito no aterro sanitário dos Mulenvos, prejudicando deste modo o ambiente da cidade de Luanda com emissões de GEE. Assim sendo, a implementação de um projeto de produção energética com base no aproveitamento e valorização do gás de aterro, permitiria uma gestão mais sustentável do RSU da cidade de Luanda e contribuiria para as necessidades energéticas da mesma, mediante o fornecimento de energia elétrica. Esta fonte de energia renovável seria uma alternativa a ter em conta, pois aceleraria a diversificação da matriz energética, reduzindo a utilização predominante de recursos como o petróleo e o gás natural.

**Palavra-chave:** Biogás de aterro sanitário, Modelos de previsão, modelo LandGEM, modelo IPCC.

## **ABSTRACT**

The use of landfill biogas can enable a sustainable change, which raises the attention of many countries interested in the diversification of the energy matrix. Therefore, a major problem that Angola is the economic crisis due to its dependence on fossil energy resources, such as oil and natural gas, which makes it imperative to carry out energy diversification, preferably including renewable sources.

In compliance with the provisions, the present work aims to theoretically estimate the energy potential of urban solid waste in the province of Luanda, considering concretely the waste deposited in the last 8 years, at the Mulenvos landfill, which by the way is the only unit of this type in the country. The work was organized in 6 chapters, fundamental for its realization.

To accurately assess the energy potential of the Mulenvos landfill, two landfill biogas prediction models were used: the LandGEM model and the IPCC model. These two models were used as extremely important tools to support a feasibility study. Therefore, a comparative study of the production of the methane flow recovered from the landfill was made and the potential of electric energy produced from this gas was estimated. From the analysis carried out, it was concluded that the energy potential of the MSW in Luanda presented good results, with emphasis on the IPCC model v.2006, as it obtained a maximum methane flow rate of 823 482 436.51 m<sup>3</sup> / year from year 2020 and an electrical power of 249.15 MW, higher than the LandGEM v.3.02 model.

The results obtained allow us to assess the waste of an energy resource, which has been made at the Mulenvos landfill, thus damaging the environment of the city of Luanda with GHG emissions. Therefore, the implementation of an energy production project based on the use and valorization of landfill gas, would allow a more sustainable management of the MSW in the city of Luanda and contribute to its energy needs, through the supply of electric energy.

This renewable energy source would be an alternative to take into account, as it would accelerate the diversification of the energy matrix, reducing the predominant use of resources such as oil and natural gas.

**Keyword:** Landfill biogas, Prediction models, LandGEM model, IPCC model.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 ENQUADRAMENTO .....	1
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO.....	2
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	4
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS .....	4
2.1.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	5
2.2 ATERRO SANITÁRIO .....	7
2.2.1 INFRAESTRUTURAS .....	9
2.3 BIOGÁS DE ATERRO .....	11
2.3.1 ETAPAS PARA OBTENÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO .....	12
2.3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO .....	14
2.4 SISTEMA DE GESTÃO E VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO .....	18
2.5 MODELOS PREVISÕES DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO .....	25
2.5.1 MODELOS DE ORDEM ZERO.....	26
2.5.2 MODELOS DE PRIMEIRA ORDEM .....	27
2.5.3 MODELO DE MULTIFASE.....	34
<b>CAPÍTULO 3. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E ECONÓMICO DE ANGOLA .....</b>	<b>37</b>
3.1 SITUAÇÃO GEOGRÁFICA .....	37
3.2 ENQUADRAMENTO MACROECONÓMICO .....	38
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGIA .....</b>	<b>40</b>
4.1 MODELOS DE PREVISÃO .....	40
4.1.1 MODELO LANDGEM V.3.02.....	41
4.1.2 MODELO IPCC V.2006 .....	43
4.2 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO CAUDAL DE BIOGÁS METANO .....	46
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO E RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
5.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DEPOSITADOS NO ASM.....	49
5.2 MODELO LANDGEM .....	50
5.3 MODELO IPCC.....	54

5.4 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE METANO DE ATERRO (LANDGEM E IPCC).....	56
5.5 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO CAUDAL DE METANO CAPTADO PARA OS MODELOS LANDGEM E IPCC.....	59
5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE METANO, OBTIDO ENTRE OS DOIS MODELOS LANDGEM E IPCC NO ASM.....	61
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>68</b>
8.1 ANEXO A.....	68
8.2 ANEXO B .....	69

## Lista de Figuras e Tabelas

FIGURA 2.1 - CARATERIZAÇÃO FÍSICA DOS RSU DA ZONA URBANA DE LUANDA EM 2019 (ASM – LUANDA, 2019).	6
FIGURA 2.2 - CARATERÍSTICAS DOS TIPOS DE ATERROS (ADAPTADO DE TCHOBANOGLIOUS, 2012).	8
FIGURA 2.3 - ESTRUTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO, (ECOANGOLA 2020).	10
FIGURA 2.4 - EQUIVALÊNCIA DE ENERGIA DO METANO (ADAPTADO DE KHELIDJ; ABDEREZZAK; KELLACI, 2012).	11
FIGURA 2.5 - ETAPAS DA DEGRADAÇÃO DOS RSU EM ATERRO (ADAPTADO DE TCHOBANOGLIOUS, 2012).	12
FIGURA 2.6 - CURVA DA PRODUÇÃO DE METANO EM ATERRO (IPCC 2006A).	13
FIGURA 2.7 - REPRESENTA A VELOCIDADE DA DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA DEGRADÁVEL (TCHOBANOGLIOUS 2012).	14
FIGURA 2.8 - SISTEMAS DE GESTÃO DO BIOGÁS (TCHOBANOGLIOUS, 2012).	18
FIGURA 2.9 - CONSTITUIÇÃO DE UM QUEIMADOR DE BIOGÁS (TCHOBANOGLIOUS, 2012).	19
FIGURA 2.10 - TURBINA A GÁS DE CICLO ABERTO (TCHOBANOGLIOUS 2012).	20
FIGURA 2.11 - QUATRO ETAPA DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DIESEL (FERNANDES, 2009).	21
FIGURA 2.12 - MOTOR TCG 2032B V16 (MWM, ENERGY. EFFICIENCY. ENVIROMENT, 2020).	22
FIGURA 2.13 - SISTEMA DE DRENAGEM COM FURO VERTICAL (TCHOBANOGLIOUS, 2012).	23
FIGURA 2.14 - SISTEMA DE DRENAGEM COM FUIROS HORIZONTAIS (TCHOBANOGLIOUS, 2012).	23
FIGURA 2.15 - PAÍSES COM USINAS DE ATERRO (THEMELIS; ULLOA, 2007).	24
FIGURA 2.16 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO.	25
FIGURA 3.17 - TEMPERATURA (OC) MÉDIA EM ANGOLA (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).	37
FIGURA 3.18 - PRECIPITAÇÃO MÉDIA (MM) (CLIMATE-DATA.ORG, 2020).	38
FIGURA 4.19 - TIPOS DE MODELOS QUANTO A SUA CLASSIFICAÇÃO.	40
FIGURA 4.20 - FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MODELO LANDGEM v.3.02	42
FIGURA 4.21 - FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MODELO IPCC v.2006	45
FIGURA 4.22 - CADEIA DO BIOGÁS DESDE A SUA EXTRAÇÃO ATÉ A INSERÇÃO A REDE ELÉTRICA.	47
FIGURA 4.23-ETAPAS PARA ESTIMAR O POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA NO ASM (2013-2020)	48
FIGURA 5.24 - PREVISÃO DE BIOGÁS MODELO LANDGEM (M3/ANO).	50
FIGURA 5.25 - PREVISÃO DE METANO MODELO IPCC (M3/ANO).	54
FIGURA 5.26 - COMPARAÇÃO DE PREVISÃO DE GÁS METANO ENTRE OS MODELOS LANDGEM E IPCC.	57
FIGURA 5.27 - COMPARAÇÃO DO METANO QUE PODERIA SER CAPTADO PARA OS ANOS EM ESTUDO (LANDGEM E IPCC).	58

TABELA 2.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS RSUs EM ANGOLA	5
TABELA 2.2 - FORMAS DE DEPOSIÇÃO DOS RSU EM ATERROS.	9
TABELA 2.3 - PERCENTAGEM VOLUMÉTRICA DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS QUE CONSTITUEM O BIOGÁS DE ATERRO (TCHOBANOGLIOUS, 2012).	11
TABELA 2.4 - CLASSIFICAÇÃO DAS BACTÉRIAS EM FUNÇÃO DAS FAIXAS DE TEMPERATURA (GERARDI 2018).	16
TABELA 2.5 - BIODEGRADAÇÃO DOS RSU (FERNANDES, 2009).	17
TABELA 2.6 - DIFERENÇA ENTRE A TURBINA DE CICLO ABERTO E FECHADO (ADAPTADO DE TCHOBANOGLIOUS, 2012)	20

TABELA 2.7 - VALORES COD RECOMENDADO PELO IPCC (ADAPTADO DO IPCC, 2006).	29
TABELA 2.8 - VALORES FCM DE ACORDO COM LOCAL (ADAPTADO DO IPCC, 2006).	29
TABELA 2.9 - VALORES DE K DE ACORDO COM O CLIMA DA REGIÃO E O LIXO (IPCC, 2006).	30
TABELA 2.10 - VALORES DE K COM BASE A PRECIPITAÇÃO ANUAL (BORBA, 2006).	34
TABELA 2.11 - VALORES DE LO COM BASE AS CARACTERÍSTICAS DO RSU (BORBA, 2006).	34
TABELA 4.12 - PARÂMETROS DO MODELO LANDGEM v3.02.	42
TABELA 4.13 - VALORES DE CODF COM BASE NA CATEGORIA DE RSU.	43
TABELA 4.14 - VALORES DE K PARA CLIMA TROPICAL HÚMIDO.	44
TABELA 4.15 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RSU DEPOSITA NO ASM.	44
TABELA 4.16 - RENDIMENTOS DOS SISTEMAS DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DEUBLEIN; STEINHAUSER, (2008) E PIRES, (2013).	46
TABELA 5.17 - QUANTIDADE DE RSU DEPOSITADO NO ASM (ELISAL-EP, 2020).	49
TABELA 5.18 - PREVISÃO DO CAUDAL DE BIOGÁS PRODUZIDO NO ASM PELO MODELO LANDGEM (2013-2020).	52
TABELA 5.19 - QUANTIDADE DE METANO QUE PODERIA SER CAPTADO NO ASM EM FUNÇÃO DO CAUDAL DE METANO PREVISTO PELO MODELO LANDGEM (2013-2020).	53
TABELA 5.20 - PREVISÃO DO CAUDAL DE BIOGÁS PRODUZIDO NO ASM PELO MODELO IPCC (2013-2020).	55
TABELA 5.21 - QUANTIDADE DE METANO QUE PODERIA SER CAPTADO NO ASM EM FUNÇÃO DO CAUDAL DE METANO PREVISTO PELO MODELO IPCC (2013-2020).	56
TABELA 5.22 - POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA PELO MODELO LANDGEM (2013-2020).	59
TABELA 5.23 - POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA PRODUZIDA PELO MODELO IPCC (2013-2020).	60
TABELA 5.24 - ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE GÁS METANO, OBTIDA ENTRE OS MODELOS LANDGEM v3.02 E IPCC v.2006 NO ASM (2013-2020).	61

## **Lista de Abreviaturas**

**ADEME-** Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

**AP-42-** Compilation of Air Pollutant Emission Factors

**ASM-** Aterro Sanitário de Luanda;

**CAA-** Clean Air Act

**CBO-** Carência Bioquímica de Oxigénio

**CH<sub>4</sub>-** Metano;

**CQO-** Carência Química de Oxigénio

**CO<sub>2</sub>-** Dióxido de Carbono;

**COVNM-** Composto Orgânico Voláteis não Metânicos

**Elisal- EP-** Empresa Pública de Limpeza e Saneamento de Luanda

**EUA-** Estados Unidos da América

**FORSU-** Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos;

**GEE-** Gases Efeitos Estufa;

**GPL-** Gás Petróleo Liquefeito

**H<sub>2</sub> –** Hidrogeno

**H<sub>2</sub>S-** Ácido Sulfúrico

**IPCC –** Intergovernmental Panel on Climate Change

**LB-** Lentamente Biodegradáveis

**MECTA-** Ministério da Cultura, Turismo e Ambiente

**MO-** Matéria Orgânica

**M.O-** Matéria Orgânica

**N<sub>2</sub>-** Nitrato

**NH<sub>3</sub>-** Amónia

**ODS-** Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

**ONU-** Organização das Nações Unidas

**O<sub>2</sub>-** Oxigénio

**PESGRU-** Plano Estratégico para Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

**PMI-** Ponto Morto Inferior

**PMS-** Ponto Morto Superior

**RB-** Rapidamente Biodegradáveis

**RNT-** Rede Nacional de Transporte de Eletricidade

**RSU-** Resíduos Sólidos Urbanos;

**SWANA-** Solid Waste Association of North América

**USEPA-**United States Environmental Protection Agency

# CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O presente trabalho de dissertação tem como maior motivação, contribuir para o desenvolvimento sustentável de Angola tendo como principal enfoque a província de Luanda concretamente o aterro sanitário dos Mulenvos (ASM), localizado no município de Viana de modo a fazer parte da resolução da problemática dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) visando a mitigação dos gases de efeito estufa (GEE).

Até aos dias de hoje, em Angola, os RSU são considerados como algo sem valor, atendendo ao fato de que em todo o país apenas existe um aterro sanitário ativo e os restantes resíduos são encaminhados para um número indeterminado de lixeiras, nas quais não são controladas as emissões e não é realizada qualquer valorização. Os RSUs, quando bem geridos podem ser valorizados quer em reciclagem de materiais quer em produção de energia elétrica renovável (Silva; Freitas, 2019). Deste modo, é fundamental que haja uma alteração na matriz energética da província em questão, principalmente por corresponder a uma conjuntura completamente petro-dependente que é menos sustentável do que uma matriz energética diversificada.

## 1.2 ENQUADRAMENTO

As áreas urbanas constituem polos de aglomeração de populações e apresentam maior diversidade de bens de consumo disponíveis pelo que é também nestas áreas urbanas que se verifica um maior potencial de geração de resíduos.

A produção de resíduos sólidos urbanos é uma fonte de impactes ambientais, mas pode também representar uma fonte de recursos valorizáveis que podem contribuir para a descarbonização de setor elétrico em Angola.

Deste modo, destaca-se a agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que define dezassete (17) Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo que o 7º objetivo destaca a necessidade de aposta nas energias renováveis e acessíveis, e o 11º objetivo aposta em cidades e comunidades sustentáveis. Partindo destes pressupostos, a adoção do aproveitamento do RSU como recurso energético é imprescindível. No caso particular de Angola, esse aproveitamento seria viável, de forma a mitigar a exploração dos recursos naturais e consequentemente aumentar o período de vida útil das instalações de tratamentos e deposição dos RSU.

Relativamente a gestão do RSU em Luanda, a entidade gestora efetua a sua recolha indiferenciada, encaminhando-os posteriormente para deposição no ASM. Por este motivo o Ministério da Cultura, Turismo e Ambiente (MCTA) traçou um Plano Estratégico para a Gestão de Resíduo Sólido Urbano

(PESGRU), como consta no Decreto Presidencial n.º 190/12, de 30 agosto, a ser implementado na totalidade do território angolano e que defende a criação de um sistema de recolha seletiva dos variados materiais produzidos nas zonas urbanas e suburbanas. São também definidas ações específicas de gestão dos RSU destinados a aterros sanitários, com vista a atingir determinados objetivos, tais como: a promoção da reciclagem de boa qualidade, a conversão de resíduos em recursos, a diminuição parcial da deposição de resíduos em aterro (principalmente de materiais que devem ser reaproveitados ou valorizados) e a dinamização do mercado dos resíduos seja ele primário ou secundário.

Durante o tempo de vida útil de um aterro sanitário, ocorre o processo de produção de biogás proveniente do Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU). Uma vez que a maior parte desse biogás é composto por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), importa recuperar o metano como gás combustível que pode ser utilizado na produção de energia elétrica. Por outro lado o impacto do metano enquanto GEE é muito superior ao do  $\text{CO}_2$ , correspondendo a cerca de 21 - 23 equivalentes de  $\text{CO}_2$  (Santos, Romanel e Van Elk 2017; Christensen et al., 2017).

Assim é importante recuperar o biogás gerado no aterro não só para promover a valorização energética do metano, mas também para evitar a sua libertação para a atmosfera agravando significativamente o efeito de estufa. Nessa base, é importante existirem mecanismos que ajudem as entidades gestoras a recuperarem o biogás, ou modelos de previsão que ajudem a estimar o potencial energético do metano gerado pelo aterro sanitário. Estas estimativas podem ser feitas com recurso a modelos de previsão de ordem zero, primeira ordem ou modelos multi-fase, em específico (Scharff and Jacobs 2006). Os modelos de primeira ordem são os mais aplicados na maior parte dos projetos, por serem de fácil manuseio pelos gestores dos aterros sanitários e por assumirem que a curva produção do caudal de metano apresenta mudanças ao longo tempo (Kamalan 2016).

### **1.3 OBJETIVO DO TRABALHO**

O objetivo principal deste trabalho de investigação é o de estimar o potencial energético dos RSU da cidade de Luanda depositados no ASM durante o período de 2013-2020 recorrendo a dois modelos técnicos de previsão de primeira ordem.

Tendo por base os diversos estudos sobre o tema, os modelos selecionados para fazer a previsão do biogás gerado no aterro sanitário dos Mulenvos, foram o LandGEM v.3.02 (Da Silva 2014) e o IPCC v.2006 (Da Silva et al. 2020), que permitirão estimar o potencial energético através do sistema de cogeração (motor de combustão interna a gás).

No que diz respeito aos contributos que se pretendem gerar com a realização do atual trabalho de investigação, destacam-se os seguintes:



- Proporcionar modelo de previsão da produção de biogás no aterro sanitário dos Mulenvos;
- Incentivar o governo de Luanda e as empresas responsáveis pela recolha RSU, a fazerem a respetiva valorização energética;
- Propor soluções de sustentabilidade de forma a mitigar as emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> no aterro dos Mulenvos;
- Mostrar que as energias renováveis são a opção adequada para mudanças do paradigma energético em Angola, de forma a cumprir-se a agenda de 2030.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação além da introdução, conclusão e recomendações, contará com quatro capítulos. A parte introdutória procura definir a motivação, o enquadramento, estabelece o objetivo do trabalho, enfatiza de forma muito resumida como se pretende proceder o estudo ímpirico, enuncia os contributos que se pretendem atingir com a elaboração do trabalho e por fim apresenta a estrutura do trabalho.

Portanto, no segundo capítulo, procurou-se fazer a revisão da literatura, sendo nela abordados aspetos sobre os resíduos sólidos urbanos, obtenção de biogás em aterro, realçando os principais métodos de valorização energéticas dos resíduos sólidos urbanos, e também os modelos de previsão de biogás de aterro, uma vez que o principal objetivo do trabalho, cinge-se na estimativa do potencial energético do aterro.

Em sequência, no terceiro capítulo procurou-se fazer um enquadramento geográfico e económico de Angola de forma resumida, visando a contextualização.

Já no quarto capítulo apresentou-se discriminadamente os modelos utilizados no presente trabalho, que serviram de suporte para a realização da análise comparativa em que assenta a metodologia.

E finalmente no quinto capítulo apresentaram-se os resultados e discussões do estudo empírico, e assim verificou-se qual o melhor modelo a aplicar.

## CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, procurou-se primeiramente abordar o conceito de RSU tendo em consideração o contexto angolano. Consequentemente fez-se referência à valorização energética dos resíduos sólidos urbanos e o aproveitamento do biogás de aterro que é proveniente da parcela de matéria orgânica contida nos resíduos sólidos urbanos, de modo a entender como mundo vem buscando alternativas para aumentar a eficiência na deposição, gerenciamento e valorização dos RSUs, seja através de aterros sanitários ou através de parques ecológicos indústrias. Que conduziu num último momento, a abordar sobre os modelos de previsão de biogás de aterro, uma vez que o principal objetivo do trabalho visa a estimativa do potencial energético do aterro.

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Apoiado no Decreto Presidencial n.º 190/12, de 24 agosto, a aprovação do regulamento sobre a gestão dos resíduos em conformidade com o disposto no nº1 do artigo 11º, da Lei n.º 5/98, de 19 de junho (lei base do ambiente em Angola), define os resíduos em Angola como um objeto que pertence a uma determinada pessoa que se desfaz do mesmo ou tem obrigação legal de o descartar, e que apresenta algumas características de risco. A composição dos resíduos oscila de acordo com cada contexto de produção, dependendo da situação socioeconómica e de hábitos e costumes de vida das comunidades que os produzem. O mesmo decreto visa estabelecer medidas adequadas no que toca à gestão de resíduos nomeadamente as operações de deposição no solo, subsolo, tratamento, recolha, transporte e armazenamento de quaisquer resíduos, excluindo os de proveniência radioativa, de forma a prevenir os impactes ambientais e proteger a saúde da população.

No que concerne à produção *per capita* dos resíduos, que é definida como a quantidade diária de resíduo produzida por habitante, pode observar-se que, em Luanda se registam valores que variam de acordo com as áreas de ocupação e a classe social da população, nomeadamente (Elisal-EP, 2019):

- Zonas urbanas apresentam um valor médio de 1kg/hab.dia;
- Zonas suburbanas apresentam um valor médio de 0.80kg/hab.dia;

#### 2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Em Angola a classificação dos RSU é feita de acordo as suas propriedades químicas, biológicas e físicas, atendendo ao descrito no Decreto Presidencial n.º 190/12, de 24 agosto no seu artigo 4º. Deste modo podemos observar na tabela 1 os detalhes dessa classificação.

***Tabela 2.1 - Classificação dos RSUs em Angola***

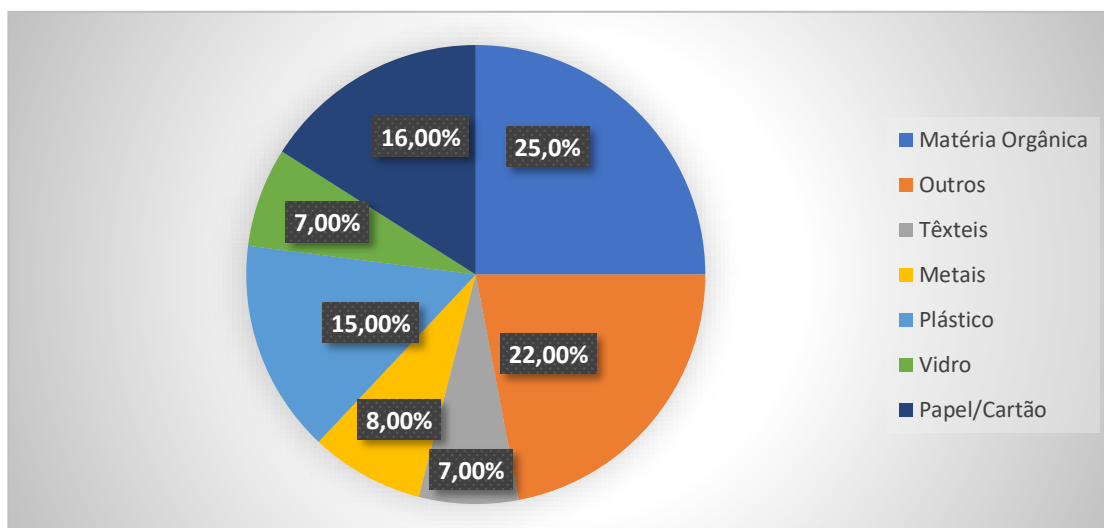
<b>Classificação</b>	<b>Definição</b>
Perigoso	São aqueles que apresentam perigosidade de forma a colocar em risco a saúde e o meio ambiente, como os que apresentam as seguintes propriedades: Radioativas, inflamáveis, corrosivas e tóxicas.
Não Perigoso	São os que não apresentam perigosidade, nomeadamente: Resíduos sólidos domésticos, comerciais, indústrias e hospitalar, etc.

Contudo, no artigo nº 3 do Decreto Presidencial n.º 190/12, de 24 agosto, é também proposta uma classificação dos resíduos produzidos em Angola quanto à sua origem incluindo: Resíduos agrícolas (RA), resíduos hospitalares (RH), resíduos industriais (RI) e resíduos sólidos urbanos (RSUs). Esta última categoria dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são especificamente regulamentados pelo Ministério do Ambiente.

### **2.1.2 CARATERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

A caracterização dos RSU para obter conhecimento sobre a sua composição e propriedades, é uma medida de extrema importância, uma vez que nos permite fazer a avaliação das frações de resíduos valorizáveis, de modo a mitigar a quantidade de resíduos deste tipo que são depositados em aterro.

Assim sendo, na figura 1 podemos verificar a caracterização dos resíduos sólidos urbanos produzidos na zona urbana e suburbana de Luanda no ano de 2019, de acordo com relatório elaborado pela Empresa Pública de Limpeza e saneamento de Luanda (Elisal-EP) (Planeamento 2020).



**Figura 2.1** - Caraterização física dos RSUs da zona urbana de Luanda em 2019 (ASM – Luanda, 2019).

Como pode observar-se a fração orgânica representa a maior percentagem (25%) do total de RSU produzido em Luanda, o que nos desperta a atenção pois esta fração orgânica, é tipicamente biodegradável pelo que é suscetível de dar um contributo relevante para a produção de biogás e consequentemente de energia elétrica. As frações com menor representatividade são o vidro e os têxteis com 7%, e os metais com 8%, o que pode significar que há menos resíduos deste tipo a serem produzidos ou já existe uma percentagem razoável de reciclagem destes materiais.

Por outro lado, é importante realçar que todo o resíduo produzido na cidade de Luanda é depositado no ASM. A valorização como a reciclagem é feita de forma autónoma, ou seja, de forma particular, pese embora a PESGRU de acordo com o Decreto Presidencial n.º 190/12, de 30 agosto estabelecer para todo o território angolano a criação de um sistema de recolha seletiva dos RSUs produzidos nas zonas urbanas e suburbanas. Este sistema de recolha seletiva visa restringir a quantidade de RSUs destinados aos aterros sanitários, tendo em vista determinados objetivos, tais como: a promoção da reciclagem dos resíduos com potencial de reutilização, a recuperação de resíduos com potencial de valorização como recursos, e desta forma diminuir a deposição de resíduos em aterro. Esta abordagem não só permite reutilizar materiais poupando as respetivas matérias-primas, recuperar o valor energético ou material de diferentes resíduos e prolongar o tempo de vida útil do aterro, na medida em que a ocupação da área disponível ocorrer mais lentamente.

Tais medidas contribuem para a dinamização do mercado de resíduos, seja ele primário ou secundário, mas este propósito pode ser limitado pela variabilidade das composições típicas dos RSUs que variam, muito de acordo com o consumo de cada zona.

Na perspetiva de Russo (2003), a caracterização física dos RSUs apresenta percentagens incertas dependendo de vários fatores, nomeadamente:

- Estação do ano;
- Nível de vida da população;
- Clima da Região.

A gestão dos RSUs na província de Luanda está a cargo da Elisal-EP que no âmbito das suas funções, recorre a operadores privados, estando encarregue apenas de monitorizar e fiscalizar estas mesmas. A empresa é titular dos ativos públicos relacionados com o serviço de limpeza da província em questão.

## **2.2 ATERRO SANITÁRIO**

Com base no Decreto Presidencial nº 190/12 de 24 de agosto-Angola, no seu artigo 3º alínea c, define aterro sanitário, como instalações controladas que albergam resíduos depositados com objetivo de os eliminar, sendo que os mesmos podem estar acima ou abaixo da superfície do solo. Na mesma perspetiva Tchobanoglous (2012), afirma que os aterros são locais de áreas amplas, com a finalidade de receber enormes volumes de RSUs.

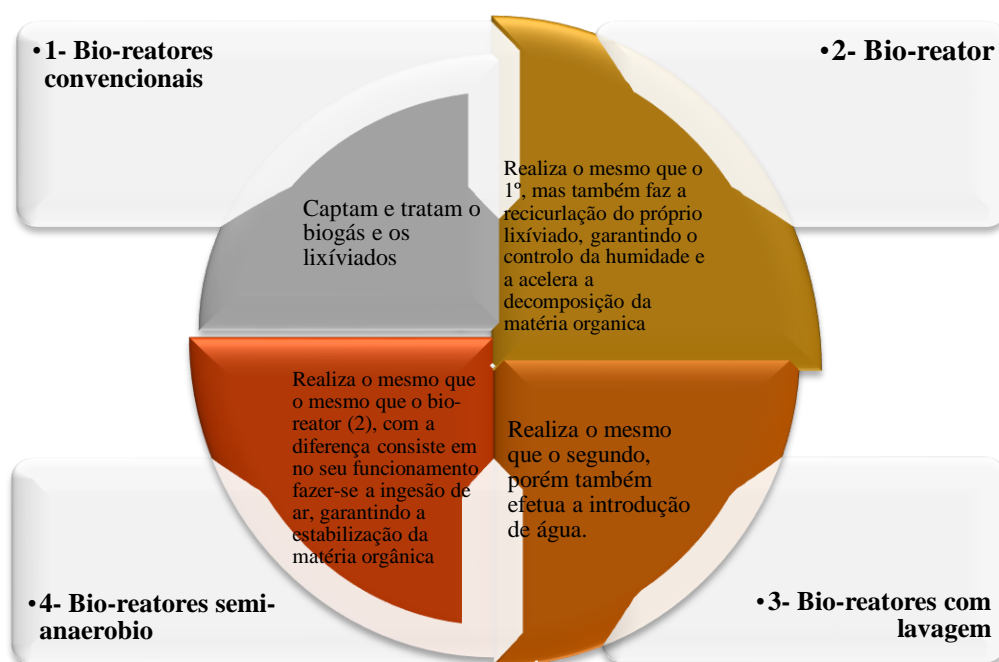
De acordo com a Diretiva de 1999/31/CE do conselho, de 26 de abril de 1999, os aterros sanitários classificam-se em três classes, nomeadamente:

- Aterro Sanitário para deposição de resíduos perigosos;
- Aterro Sanitário para resíduos não perigosos;
- Aterro Sanitário para deposição de resíduos inertes.

Um aterro é assim um sistema controlado, mas ao ar livre, ou seja, está sujeito à receção de águas pluviais que uma vez entrando em contacto com os RSU dissolvem componentes e potenciam a degradação dos RSUs com geração de novos componentes, por sua vez solúveis em água. Destes processos resulta um efluente líquido designado por águas lixiviantes, lixiviado de aterro ou chorume como é designado em Angola. O biogás resulta da degradação Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos (FORSU) que são depositados no aterro. Este produto gasoso é constituído maioritariamente por CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e apresenta um poder calorífico que permite a sua valorização energética (Bianek et al. 2017). Por outro lado, o metano apresenta um potencial de contribuir para o efeito de estufa que é cerca de 21 vezes superior ao do CO<sub>2</sub> pelo que a sua captação e valorização é uma medida essencial para a mitigação das alterações climáticas (Santos et al. 2017).

Os aterros sanitários são, portanto, considerados verdadeiros bio-reactores, na medida em que a matéria orgânica depositada vai ser gradualmente decomposta nas zonas mais profundas e menos expostas ao oxigênio atmosférico, pela ação das bactérias anaeróbias existentes nos materiais e no meio ambiente e que nas condições do aterro dispõem de substratos fermentáveis que ao serem decompostos geram o biogás de aterro ocorrendo também libertação de calor o que favorece o processo. A captação do biogás de aterro e dos lixiviados, permite efetuar portanto a valorização energética de uma fração destes resíduos, e minimiza os efeitos da deposição ambiental dos resíduos na medida em que previne os impactos ambientais da dispersão destes efluentes em solos e águas subterrâneas (Tchobanoglous, 2012).

Dependendo das características específicas de cada aterro e dos processos tecnológicos neles implementados podem ocorrer diferentes formas de degradação dos resíduos e de recuperação dos produtos líquidos e gasosos. De acordo com estas diferentes configurações os aterros sanitários podem ser equiparados a diferentes tipologias de bio-reactores tal como apresentado na figura 2.2, segundo a classificação proposta por Tchobanoglous (2012):



**Figura 2.2 - Caraterísticas dos tipos de aterros (Adaptado de Tchobanoglous, 2012).**

Em resumo, a construção e utilização de aterros sanitários tem como objetivo primordial diminuir consideravelmente os impactos ambientais provocados pela deposição não controlada de RSUs, no meio

ambiente nomeadamente os efeitos nocivos da dispersão de resíduos nos diferentes compartimentos ambientais e da sua degradação progressiva sem qualquer tipo de valorização.

### 2.2.1 INFRAESTRUTURAS

Os aterros sanitários são infraestruturas sanitárias indispensáveis, que se traduzem de imediato numa mais-valia para os países, uma vez que comportam vários benefícios, conforme Decreto Presidencial nº 196/12 de 30 de agosto-Angola nomeadamente:

- Apresentam custo de tratamento e de exploração, e custos de investimento inicial mais baixos face a outras tecnologias;
- Permitem a entrada em funcionamento num curto espaço de tempo;
- Permitem a gestão e deposição de diferentes tipos de RSUs;
- Possibilitam a introdução de soluções complementares que permitem corresponder à designada política dos “3R’S” (Reduzir, Reciclar, Reutilizar);
- Podem assumir diversas opções de tratamento para os efluentes líquidos e gasosos;
- Não exigem grandes competências e quadro especializados, pois trata-se de uma tecnologia de baixo grau de complexidade;
- Podem viabilizar o aproveitamento energético ou calórico, a partir do efluente gasoso.

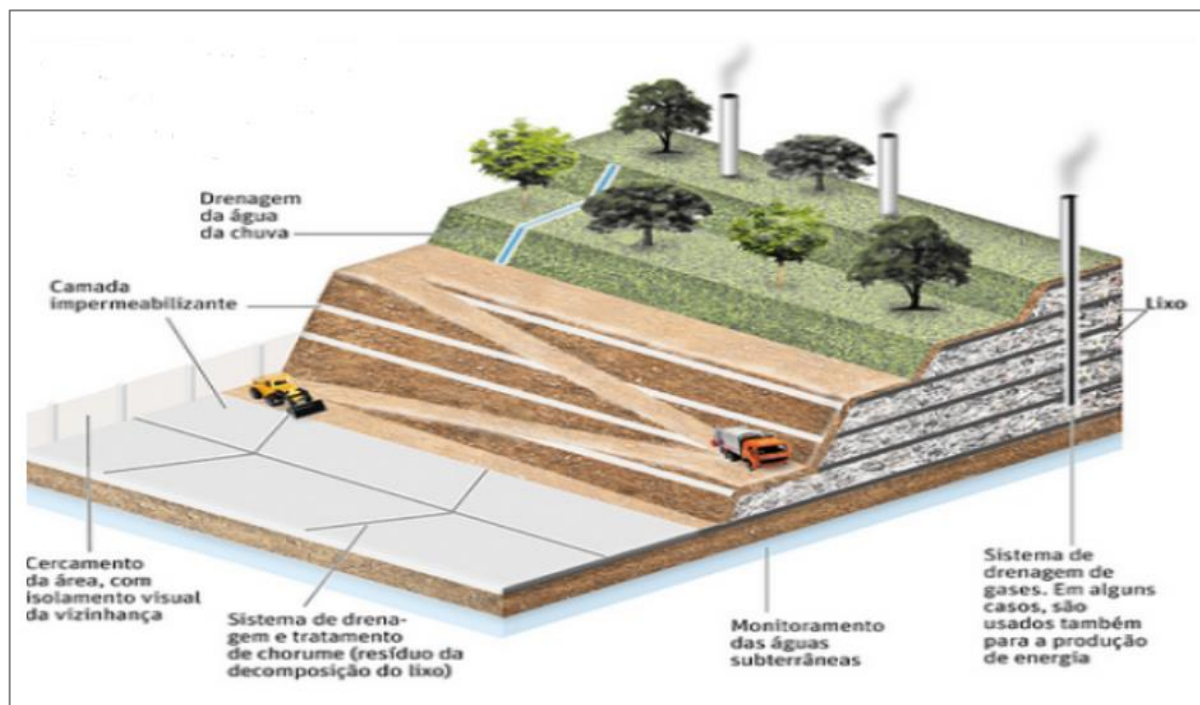
Tendo em conta o disposto, Cabeças (2005), afirma que os resíduos para chegarem à referida infraestrutura, seguem três formas de deposição, como podemos observar na tabela 2.2.

*Tabela 2.2 - Formas de deposição dos RSUs em aterros.*

Formas de deposição	Definição
<b>Tradicional</b>	Consiste na deposição dos RSUs a grosso numa célula diária sendo de seguida arrumados e compactados.
<b>Por enfardamento</b>	Os RSUs são compactados por meios próprios e posteriormente direcionados para o aterro.
<b>Mista</b>	É a junção das duas formas anteriores referidas, apenas estabelece que os RSUs antes de serem depositados no aterro devem ser triturados.

De acordo com Manfredi (2009), as infraestruturas contêm várias células e devem ser cobertas com terra no topo, com a finalidade de tapar os resíduos, como também controlar a infiltração de água e oxigénio, de forma a criar condições anaeróbias dentro das células, promovendo a existência de microrganismos

anaeróbios responsáveis pela decomposição parcial dos resíduos e a geração do gás de aterro. Como podemos observar na figura 2.3.



*Figura 2.3 - Estrutura de um aterro sanitário, (Ecoangola 2020).*

os aterros sanitários compreendem sistemas de proteção ambiental que é necessário instalar durante a sua execução, tais como, sistema de drenagem de biogás, camadas impermeabilizantes, sistema de drenagem das águas pluviais, sistema de drenagem e tratamento das águas lixiviantes/chorume, sistema periférico de valetas (sistemas de drenagem das águas pluviais para fora do aterro) e sistema de queima do biogás. Para além dos referidos sistemas, existem outras instalações (unidade de triagem, trituração e pesagem) que dão suporte aos aterros sanitários e onde se efetuam operações de recuperação de resíduos para reciclagem ou de pré-tratamento dos resíduos antes da sua deposição no aterro (Cabeça,2005). Contudo é de fundamental importância, que na fase de construção do projeto, o responsável pela execução tenha desde logo em conta as diferentes fases de vida útil do aterro e dos principais interesses ligados ao seu funcionamento e comissionamento de forma a planificar e incluir os equipamentos e instalações necessários à boa gestão do aterro ao longo do seu período de existência.



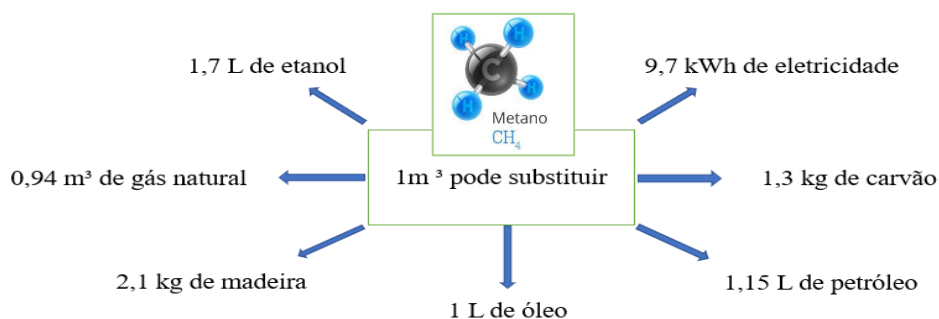
## 2.3 BIOGÁS DE ATERRO

Tal como se tem vindo a referir, o biogás de aterro é proveniente da decomposição anaeróbia da fração orgânica contida nos RSUs, que é depositado em aterro sanitário. Assim sendo, a sua composição varia no decorrer do processo de decomposição, mantendo-se, no entanto como gases predominantes o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{CO}_2$ , que correspondem a mais de 95% do volume total de biogás. Deste modo, podemos observar na tabela 2.3 a composição típica do biogás de aterro e as percentagens relativas dos seus principais componentes (Russo, 2003).

**Tabela 2.3** - Percentagem volumétrica dos principais elementos que constituem o biogás de aterro (Tchobanoglous, 2012).

Principais Gases	Percentagem volumétrica (%)
$\text{CH}_4$	45-60
$\text{CO}_2$	40-60
$\text{N}_2$	2-5
$\text{O}_2$	0,1-1
$\text{NH}_3$	0,1-1
$\text{H}_2\text{S}$	0-1
$\text{H}_2$	0-0,2

Assim constata-se, que para além dos seus principais constituintes (metano e dióxido de carbono), o biogás contém ainda quantidades variáveis de gases, como amônia ( $\text{NH}_3$ ), hidrogénio ( $\text{H}_2$ ), sulfureto de hidrogénio ou gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), azoto ( $\text{N}_2$ ) e oxigénio ( $\text{O}_2$ ), em concentrações na gama de 0,1 a 5% (v/v) e que variam com a composição dos materiais depositados e com o tempo de vida do aterro. Relativamente ao metano recuperado do aterro, destaca-se na figura 2.4 a sua equivalência energética com outros combustíveis e com eletricidade, ou seja, o seu potencial de substituição destes recursos.



**Figura 2.4** - Equivalência de energia do metano (Adaptado de Khelidj; Abderezzak; Kellaci, 2012).

### 2.3.1 ETAPAS PARA OBTENÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO

A produção de biogás de aterro ocorre em 5 fases, de acordo com o estado de decomposição da matéria orgânica, como podemos observar na figura 2.5 (Tchobanoglous, 2012).

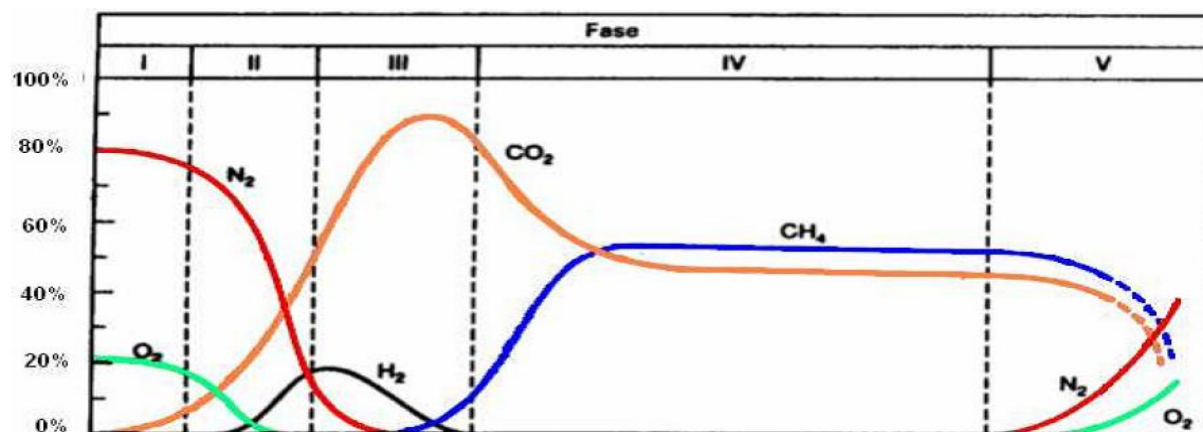


Figura 2.5 - Etapas da degradação dos RSUs em aterro (Adaptado de Tchobanoglous, 2012).

Como se pode observar na figura 2.5, a degradação dos RSUs em aterro sanitário por decorre em 5 fases que são definidas da seguinte forma:

A *fase I*, é conhecida como fase rápida ou (aeróbia), por ser onde ocorre o consumo de oxigênio retido no RSU, em curto espaço de tempo, normalmente dias ou até semanas. Ao mesmo tempo a atuação dos microorganismos que promovem a formação de água e de dióxido de carbono, origina uma pressão positiva no interior da célula de aterro o que impede a difusão dos gases atmosféricos para o seu interior e a reposição das concentrações de oxigênio iniciais. Assim a concentração de O<sub>2</sub> mantém-se residual, e a temperatura aumenta devido ao calor libertado nesta etapa de degradação aeróbia (Fernandes, 2009).

De seguida deparamo-nos com a *fase II*, onde se inicia a predominância das condições anaeróbias, fase essa também conhecida como fase de transição. Nela também ocorre a conversão da matéria orgânica em ácidos gordos, ácidos orgânicos, açúcares aminoácidos e outros produtos fermentáveis, durante um período de tempo mais longo que o da fase I, e que pode variar entre um a seis meses, dependendo das características do aterro e das condições ambientais. Nesta fase verifica-se a diminuição do pH dos lixiviados, devido à dissolução de ácidos orgânicos e de CO<sub>2</sub> nesta fase líquida, observa-se a formação de H<sub>2</sub> e a diminuição acentuada do N<sub>2</sub> (Tchobanoglous, 2012).

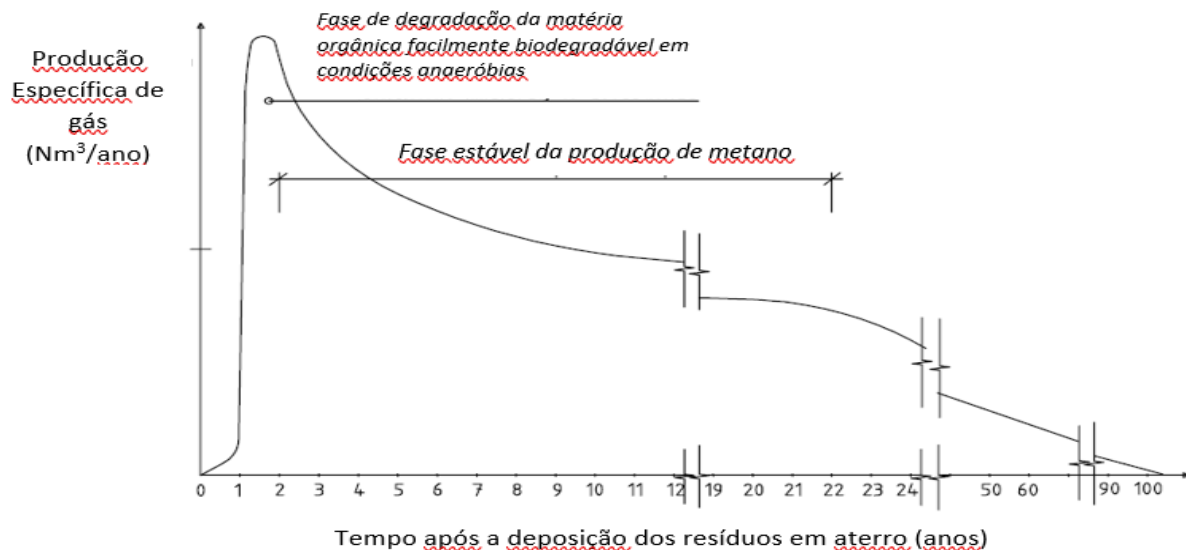
Relativamente à *fase III*, esta ocorre em períodos de 3 meses a 3 anos, bastante superiores às durações típicas das fases I e II. Nesta fase dá-se o início das condições puramente anaeróbias o que promove a ação das arqueobactérias que degradam a matéria orgânica produzindo ácidos gordos, através

reação acidogénica (acidogenese). faz com que seja considerada como a fase ácida, mas também é nela onde. Assim, verifica-se o surgimento do metano em pequeno volume e dióxido de carbono em maior quantidade. Como já havíamos dito na fase anterior, o pH reduz muito, devido à acumulação de ácidos orgânicos e  $\text{CO}_2$ , o que também contribui para o aumento da CQO (carência química de Oxigénio) e de CBO (Carência Bioquímica de Oxigénio) (Russo, 2003).

A fase IV, ocorre num período bastante demorado, entre oito a quarenta anos. Sendo considerada como a fase metanogénica, por haver apenas geração de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  que são os principais gases constituintes do biogás. Nesta fase observa-se um aumento considerável do pH do meio e a estabilização das velocidades da produção e da composição do biogás (Tchobanoglous, 2012).

Finalmente a fase V, que tal como a fase IV, ocorre num período muito longo, entre um a quarenta anos, é considerada a fase final do processo pois observa-se a redução na geração de biogás ao longo do tempo até chegar ao ponto em que já não é possível fazer a extração do mesmo. Nesta fase, completa-se a conversão da matéria orgânica disponível em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , restando no interior do aterro apenas os substratos de baixa degradabilidade que não podem ser convertidos (Russo, 2003).

Na perspetiva de Cabeça, (2005), os sistemas de drenagem e de captação de biogás devem ser instalados durante a fase de exploração do aterro, para que se aproveite o máximo de biogás. Na figura 2.6 apresenta-se a curva da produção de metano em aterro.



**Figura 2.6 - Curva da produção de metano em aterro (IPCC 2006a).**

Como se pode observar na figura 2.6, a produção de metano aumenta rapidamente no espaço de um ano e prossegue em níveis elevados enquanto a matéria orgânica facilmente degradável está disponível e mesmo após a utilização destes substratos durante mais alguns anos nos quais ocorre a conversão de substratos mais recalcitrantes. Este comportamento evidencia que a fase estável da produção de metano

é a fase ideal para exploração, consequentemente a instalação de sistema de drenagem e de captação deve ser realizada em simultâneo com a instalação do próprio aterro sob pena de se perder a fase de maior produtividade.

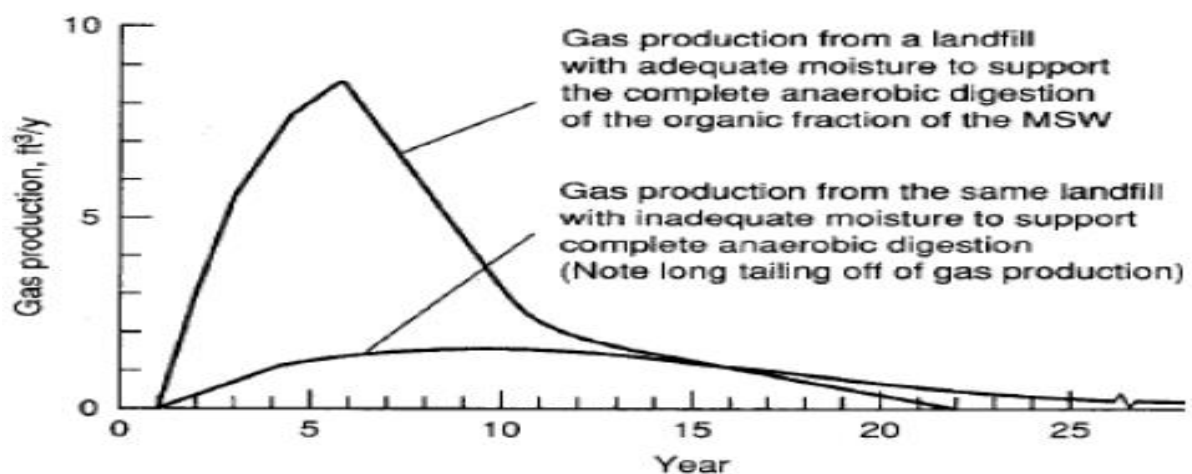
### 2.3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE ATERRO

É de salientar que existem diversos fatores que influenciam e que têm um impacto direto nas atividades biológicas no interior do aterro, podendo destacar-se a humidade, temperatura, pH, composição dos RSUs e a sua distribuição dos RSUs (Russo, 2003).

#### 2.3.2.1 Humidade

De acordo com Tchobanoglous (2012), o valor ótimo de humidade num aterro, para que se maximize a produção de biogás encontra-se no intervalo de 45% - 60%, e segundo Russo, (2003), o valor mínimo da humidade necessário para que ocorra a digestão anaeróbia encontra-se no intervalo de 10% - 20%. Este valor mínimo está relacionado com a quantidade de meio líquido necessário para que as bactérias metanogénicas, possam proliferar. A humidade no interior do aterro resulta da infiltração de água da chuva bem como dos processos de degradação da matéria orgânica e tem impacto direto na produção de biogás (Russo, 2003).

Por outro lado, Russo (2003), afirma que um teor de humidade demasiado elevado afeta negativamente a produção de biogás, uma vez que promove a diluição dos substratos e das bactérias metanogénicas, o que não favorece as reações de degradação. Na figura 2.7, podemos observar a representação da velocidade de decomposição da matéria orgânica.



**Figura 2.7** - Representa a velocidade da decomposição da matéria degradável (Tchobanoglous 2012).

Na figura 2.7 podemos observar as duas curvas que representam a produção de biogás em condições de humidade adequadas e inadequadas, o que evidencia a grande influência deste parâmetro na produção de biogás, afetando a concentração máxima de gás atingida e o tempo total de produção. Como já foi dito, este parâmetro de extrema importância, pode ser controlado pela recirculação de lixiviados e com a introdução de água, assegurando desta forma as condições ótimas para produção de biogás.

#### **2.3.2.2- pH**

Sendo um dos fatores que mais afeta o metabolismo dos microrganismos, qualquer variação neste parâmetro pode causar importantes alterações no consórcio dos microrganismos, portanto, afeta significativamente a produção de biogás. Com a degradação dos carboidratos, formam-se produtos como os ácidos orgânicos que favorecem a diminuição do pH e constituem substratos para a produção de metano (Ayu; Aryati, 2010).

Assim a redução do pH indica uma desestabilização acídica devido à acumulação de ácidos orgânicos, e pode ser indiretamente determinada através do consequente aumento na produtividade de biogás, visto ser o único parâmetro que permite verificar a instabilidade acídica de uma forma rápida e eficaz (Matheri et al., 2017).

Para valores de pH inferiores a 7, ocorre agregação de partículas e melhora a estabilidade de nanopartículas. Assim sendo, o tamanho e a geometria das nanopartículas presentes no aterro também podem ser controlados variando o pH (Sekoai et al., 2019).

De acordo com vários autores, o intervalo de pH mais adequado para produção de biogás de aterro situa-se na gama de 6,8 a 7,2, decrescendo a produtividade de biogás para valores de pH superiores ou inferiores a esta gama (Tchobanoglous, 2012).

#### **2.3.2.3 Temperatura**

A temperatura tem um impacto duplo na produção de biogás, uma vez que tanto a temperatura externa (ambiental) como a temperatura no interior do aterro sanitário afetam a produção de biogás. Para operar na temperatura ideal, é importante considerar o tipo de microrganismo presente e as condições em que ele sobrevive. Os microrganismos são classificados como psicrófilos, mesófilos e termófilos de acordo com a respetiva faixa de temperatura ótima de crescimento (Russo, 2003). as gamas de temperaturas correspondentes a cada uma destas designações são apresentadas na tabela 2.4.

**Tabela 2.4 - Classificação das bactérias em função das faixas de temperatura (Gerardi 2018).**

Classificação das bactérias	Faixa de temperatura (°C)
Psicrófila	0 – 10
Mesófila	20 – 40
Termófila	45 - 55

A temperatura no interior do aterro situa-se predominantemente nas faixas mesófila e termófila o que indica que as bactérias metanogénicas são predominantemente mesófilas e termófilas e as correspondentes atividades biológicas são favorecidas por esta gama de temperaturas, culminando em maior produção de biogás (Surra et al., 2018). Mas, é sobretudo na faixa termófila que se atinge maior taxa de produção de biogás, e consequentemente, maior produção de energia elétrica. Nesta faixa de temperaturas existe maior eliminação de agentes patogénicos e maior degradação dos substratos.

A faixa termófila, desperta grande interesse devido à quantidade de biogás que produz, a uma temperatura de 55°C (Matheri et al., 2017), mas na faixa mesófila a produção de biogás pode ser mais regular, devido ao fato das bactérias metanogénicas predominantes nessa gama de temperaturas serem mais robustas e menos suscetíveis a desvios dos parâmetros ambientais. Importa realçar que a temperatura ótima nessa gama é especificamente de 35°C (Matheri et al., 2017).

Contudo, é importante frisar que as fases acima descritas variam tendo em conta diversos fatores tais como (Tchobanoglous, 2012):

- Tipo de aterro sanitário;
- Distribuição;
- Quantidade;
- Características da matéria orgânica;
- Meteorologia (temperatura e pluviosidade).

Por outro lado, a ausência de água dificulta ou atrasa o processo metabólico das bactérias metanogénicas e alta concentração dos resíduos dificulta a chegada da água na fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, atrasando a degradação (Tchobanoglous, 2012).

#### **2.3.2.4 Composição dos RSUs**

A composição dos RSUs é um dos fatores de extrema importância na obtenção de biogás CH<sub>4</sub> no interior do aterro, uma vez que a produção de biogás é inversamente proporcional à quantidade de matéria biodegradável depositada em aterro. Em função disso, a velocidade de degradação de cada constituinte da

matéria biodegradável pode ser separada em duas classes: Rapidamente biodegradáveis (RB) e lentamente biodegradáveis (LB) (Tchobanoglous, 2012). Podemos observar na tabela 2.5 exemplos dos materiais tipicamente encontrados em RSUs.

**Tabela 2-5 - Biodegradação dos RSUs (Fernandes, 2009).**

<b>Componentes de Resíduos Orgânicos</b>	<b>RB</b>	<b>LB</b>
<b>Restos alimentares</b>	<b>X</b>	
<b>Papel de jornal</b>	<b>X</b>	
<b>Papel de escritórios</b>	<b>X</b>	
<b>Papelão</b>	<b>X</b>	
<b>Plásticos</b>		
<b>Têxteis</b>		<b>X</b>
<b>Borracha</b>		<b>X</b>
<b>Couro</b>		<b>X</b>
<b>Resíduo de jardim</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Madeira</b>		<b>X</b>
<b>Orgânicos variados</b>		<b>X</b>

Como podemos ver na tabela 2.5, o plástico não está incluído nesta classificação, porque esta fração é composta por materiais considerados não degradáveis. Os resíduos de jardim estão referenciados nas duas classificações pois incluem uma fração de resíduos rapidamente biodegradáveis (folhas e recorte da relva), que correspondem a cerca de 60% da massa total e uma fração de resíduos lentamente biodegradáveis (proporção lenhosa dos resíduos de jardim) que corresponde aos restantes 40%.

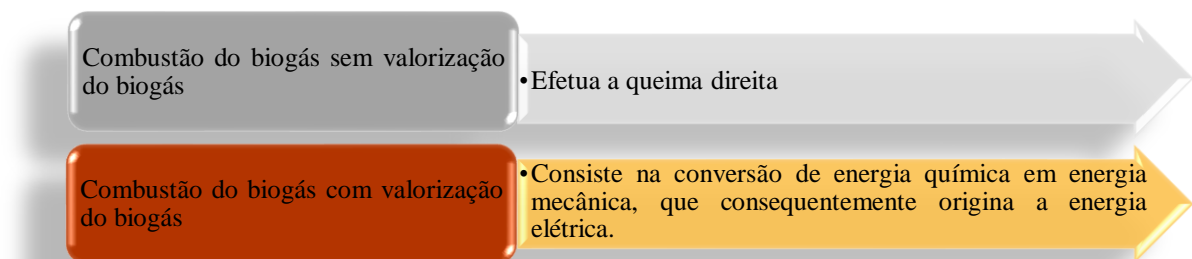
#### **2.3.2.5 Distribuição dos RSU no Aterro**

A produção do biogás não é uniforme em toda a área do aterro. Esta variação está ligada à própria constituição da matéria biodegradável e ao ritmo de deposição dos resíduos no aterro. Este facto deriva

da variabilidade dos RSUs e da forma gradual como são distribuídos no aterro o que resulta em características não uniformes de composição das várias células e consequentemente assimetrias na biomassa biodegradável disponível em cada zona do aterro (Russo, 2003).

## 2.4 SISTEMA DE GESTÃO E VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

Existem várias formas de aproveitamento do biogás de aterro (sem valorização do biogás e com valorização do biogás) que devem ser acompanhadas por uma boa gestão, tais como a queima direta, valorização energética e até mesmo para o aquecimento da própria usina, o que por sua vez irá depender da quantidade de gás que é gerado e do destino que se pretende dar (Themelis; Ulloa, 2007). Assim as formas de aproveitamento do biogás, apresentam-se na figura 2.8:

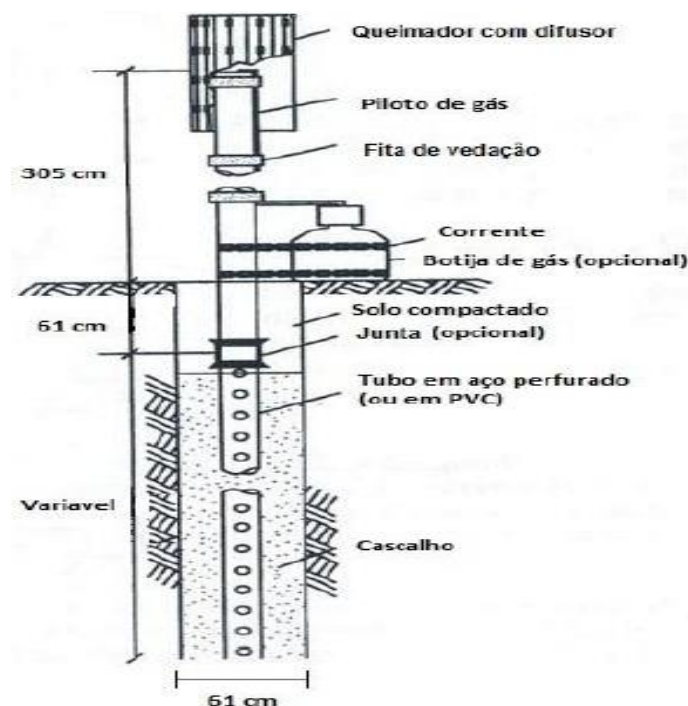


**Figura 2.8 - Sistemas de Gestão do biogás (Tchobanoglous, 2012).**

Na Combustão do biogás sem valorização do biogás, o destino a se propor ao biogás gerado é a queima direta. Esta medida é adotada em aterros sanitários utilizando queimadores, e o biogás deve ser queimado com temperatura acima de 1000 °C, com o intuito de transformar completamente o CH<sub>4</sub> em CO<sub>2</sub>, mitigando assim, as emissões dos GEE (Themelis; Ulloa, 2007). É uma abordagem muito pouco eficiente pois a energia contida no biogás não é de todo valorizada sendo libertada como calor na atmosfera, através da dispersão dos gases da combustão (CO<sub>2</sub> e vapor de água).

Por outro lado, esta solução é frequentemente adotada quando a quantidade do biogás produzido é baixo, coloca em questão a possibilidade de instalação de moto geradores para aproveitamento energético (Themelis; Ulloa, 2007). A figura 2.9 ilustra um queimador de aterro sanitário que é utilizado para combustão direta do biogás.

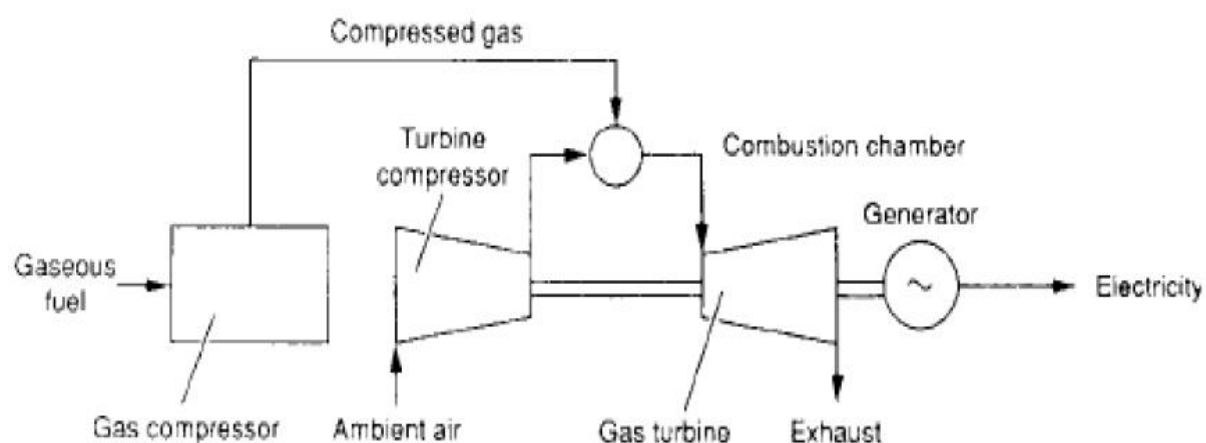




**Figura 2.9 - Constituição de um queimador de biogás (Tchobanoglous, 2012).**

Já a combustão de biogás de aterro com valorização energética é feita quando o biogás gerado em aterro sanitário é suficientemente elevado, ao ponto de despertar interesse ao organismo responsável pela gestão do aterro, e justificar a valorização energética. Deste modo é possível transformar o biogás em energia elétrica, de forma a que o aterro seja autossustentável ou até explorar a possibilidade de ligação à rede elétrica, com o intuito de mitigar a problemática energética e principalmente proporcionar soluções de sustentabilidade. A conversão do biogás em energia elétrica é possível através de motores a gás e turbinas a gás (Moya et al., 2017).

As turbinas a gás são máquinas de combustão interna bastante utilizadas em aterros sanitários, e apesar de serem menos eficientes do que os motores de combustão interna, continuam a ser equipamentos viáveis para a valorização do biogás. A operação da turbina a gás pode dividir-se em quatro etapas principais: admissão, compressão, combustão e expansão. Na fase de admissão, o ar entra no compressor através da válvula de admissão da turbina. Em seguida, na fase de compressão o ar atmosférico é comprimido até atingir pressões adequadas à sua admissão à câmara de combustão. Na fase de combustão o ar comprimido será misturado com o combustível ( $\text{CH}_4$ ) também pressurizado e sofre ignição, criando uma expansão de gases de combustão quentes. Finalmente, estes gases quentes acionam a turbina de potência e geram energia mecânica. Esta energia mecânica é utilizada para gerar energia elétrica por intermédio de um gerador elétrico (Moran e Shapiro 2006).



**Figura 2.10** - Turbina a gás de ciclo aberto (Tchobanoglous 2012).

Na figura 2.10, apresenta-se o diagrama de uma turbina a gás com ciclo aberto cujo princípio de funcionamento se baseia nas três fases de compressão, combustão e expansão. Existem também turbinas em ciclo fechado que operam utilizando um fluido intermédio (habitualmente água) que sofre ciclos de aquecimento e compressão seguido de expansão e arrefecimento transportando assim energia térmica de uma fonte exterior, energia essa que é convertida em energia mecânica e posteriormente energia elétrica na turbina. As diferenças entre turbinas em ciclo fechado e em ciclo aberto são sumarizadas na tabela 2.6.

**Tabela 2.6** - Diferença entre a turbina de ciclo aberto e fechado (Adaptado de Tchobanoglous, 2012)

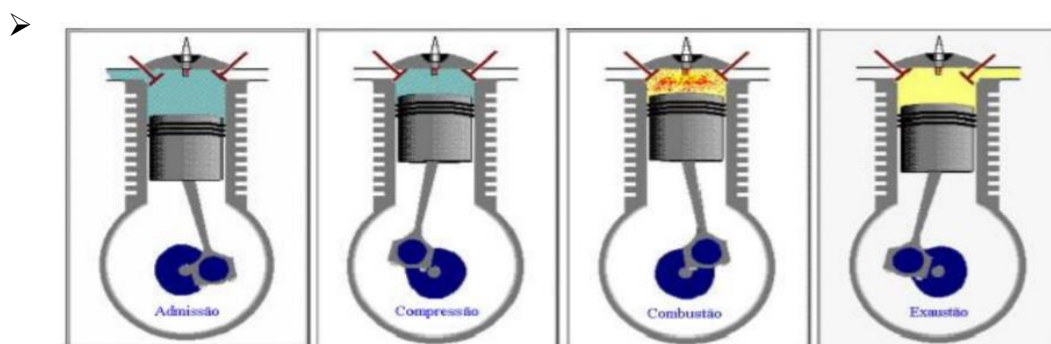
Tipos de turbinas	Diferença
<b>Ciclo aberto</b>	O fluido de trabalho é a mistura de ar e o combustível que sofre combustão e expansão. Os gases de combustão são libertados na turbina
<b>Ciclo fechado</b>	É um fluido intermedio que recebe energia de uma fonte exterior tipicamente uma caldeira. Os gases de combustão são libertados na caldeira.

Nestes tipos de configurações das turbinas, a mais utilizada é a turbina a gás de ciclo aberto (Tchobanoglous, 2012).

Os motores de combustão interna, como mencionado anteriormente, são também uma das tecnologias usadas para fazer a valorização energética do biogás. Neste contexto iremos abordar dois tipos de motores, que são: Motores a diesel e motores a gás (Freire et al., 2017).

- O princípio de funcionamento nos motores a diesel inicia-se como êmbolo no Ponto Morto superior (PMS). A válvula de admissão está aberta e o êmbolo ao descer aspira o ar para dentro do cilindro e consequentemente atinge o Ponto Morto Inferior (PMI), e a válvula de admissão fecha. Em seguida, o êmbolo inicia o movimento ascendente o que vai provocar a compressão do ar e o consequente aquecimento devido ao efeito de Joule (Imperial 1980). Pouco antes de atingir o PMS o combustível começa a ser pulverizado pelos injetores, misturando-se com ar quente, até que se dá a combustão. A combustão é controlada pela taxa de injeção. O combustível começa a ser injetado um pouco antes do PMS, devido ao fato de atingir a quantidade suficiente para uma perfeita mistura e consequentemente uma boa combustão.

A expansão dos gases produzidos na combustão inicia-se após o PMS do êmbolo com a mistura (ar mais combustível) na proporção certa para a combustão espontânea. Finalmente, o ciclo termina com a fase de escape ou exaustão na qual o êmbolo retorna ao PMS, o que faz com que os gases de combustão saiam do cilindro, retomando o ciclo. Neste tipo de motores cumpre-se os quatro tempos do ciclo de Carnot, que são: admissão, compressão, expansão (combustão) e escape. Na figura 2.11 estão representadas estas etapas de funcionamento de um motor diesel.



**Figura 2.11** - Quatro etapa de funcionamento do motor diesel (Fernandes, 2009).

- O princípio de funcionamento dos motores a gás não difere muito dos motores a diesel. A grande diferença encontra-se na entrada, que inclui a pré-mistura do combustível gasoso com o ar, seguindo-se a compressão da mistura que é admitida ao interior da câmara de combustão, onde acontece a explosão e por fim o escape.

Entre os dois tipos de motores de combustão o menos utilizado é o do tipo diesel, tomando em conta que o  $\text{CH}_4$  apresenta constante variação na sua composição, o que torna muito difícil este tipo de sistema. A capacidade da maioria dos geradores de gás de aterro varia entre 0,3 até 4,5MW, no entanto, a figura

2.12 ilustra um gerador a gás de aterro V16, com uma potência ativa de 4,5MW concebido pelo fabricante de motores a explosão chamada MWM Energy. *Efficiency. Enviroment* (MWM 2020) .

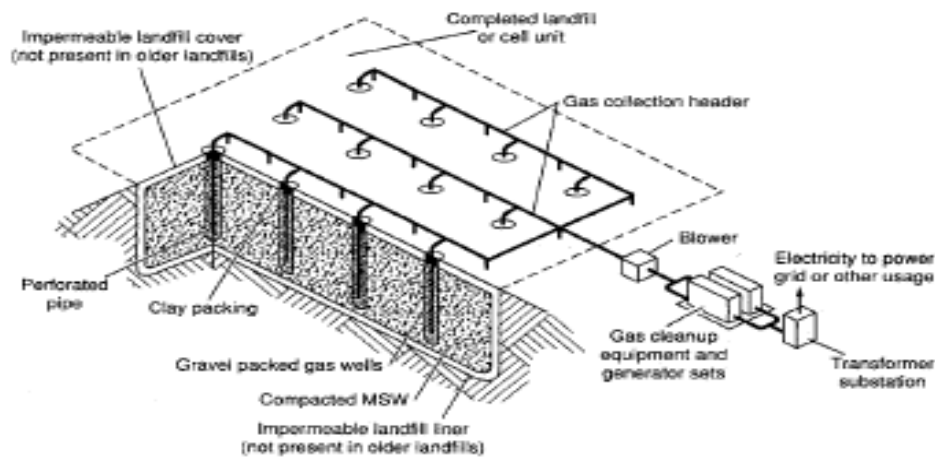


**Figura 2.12** - Motor TCG 2032B V16 (MWM, *Energy. Efficiency. Enviroment*, 2020).

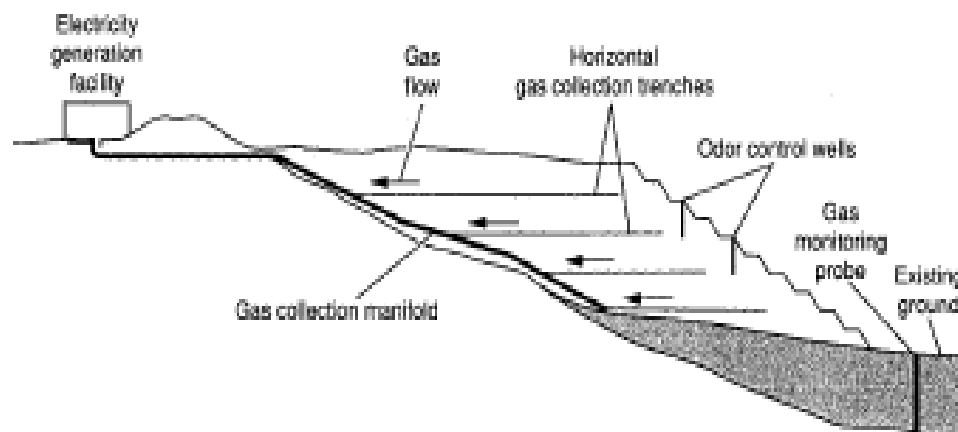
Todavia, só é possível a conversão energética ou a queima controlada do biogás se for efetuada a sua recolha ou captura através de sistemas de drenagem, que são classificados em dois tipos (Tchobanoglous, 2012):

- Sistema de drenagem passivo: baseia-se no fato de aliviar a pressão do biogás no interior do aterro, fazendo com que haja redução da libertação do mesmo na lateral do aterro. Para prevenir a libertação atmosférica podem também ser instalados ventiladores no exterior do aterro, concretamente no final do aterro, estendendo-se até à massa de resíduos sólidos, de forma a criar uma pressão de ar que promove a movimentação do biogás no sentido dos pontos de captação. Este sistema é aplicado, quando a pressão do biogás é muito baixa, de forma a evitar a migração subterrânea do biogás. Este método é muito utilizado em aterros controlados de forma a fazer-se a queima direta do biogás. Os modelos matemáticos preveem que as aberturas passivas não são eficazes no controle do movimento do biogás em condições normais.
- Sistema de drenagem ativo: o biogás é captado através de drenos perfurados equipados com bombas de sucção o que permite criar uma pressão negativa no aterro o que faz com que o biogás gerado tenda a migrar para os drenos garantindo assim a sua captação eficiente. Este

tipo de sistema é muito utilizado em aterros que estão localizados próximos de áreas residenciais pois previne a libertação acidental de metano com possíveis consequências negativas para as populações e meio ambiente na envolvente do aterro. Neste tipo de sistema é de extrema importância fazer a valorização energética. Existem dois tipos de sistemas de drenagem ativo, com instalação vertical ou horizontal dos tubos de drenagem, como podemos observar nas figuras 2.13 e 2.14 respetivamente.



**Figura 2.13** - Sistema de drenagem com furo vertical (Tchobanoglous, 2012).

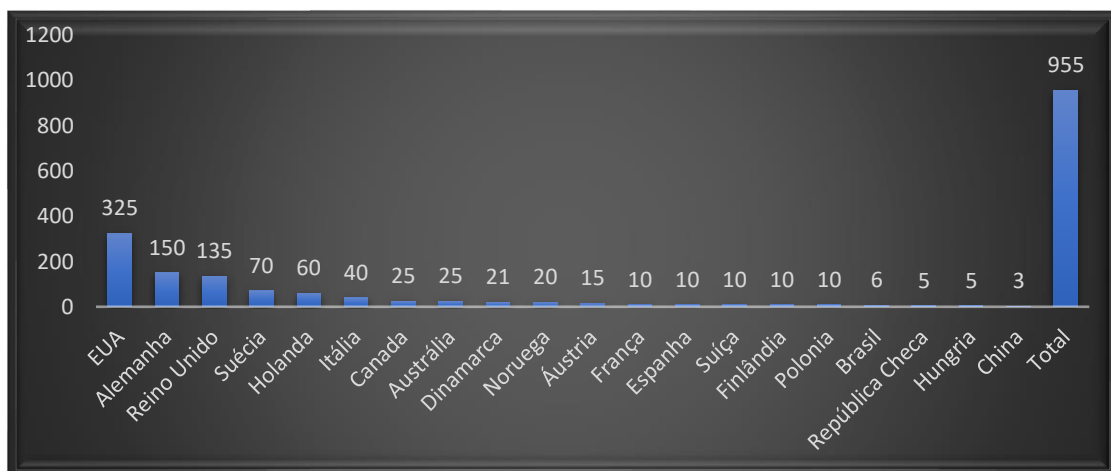


**Figura 2.14** - Sistema de drenagem com furos horizontais (Tchobanoglous, 2012).

Um dos cuidados de extrema importância a ter em conta nos aterros sanitários para garantir a geração de pressão negativa, modo é a selagem adequada para garantir a eficiente captação do biogás e evitar a infiltração de ar ambiente. Caso a impermeabilização não seja bem feita, pode ocorrer a infiltração de ar que se vai misturar com o biogás, diminuindo o seu poder calorífico. A entrada de ar na célula de aterro pode também interferir no crescimento das bactérias metanogénicas, reduzindo assim a produção de metano. Outro aspeto negativo da entrada de ar no sistema de captação de biogás é a possibilidade de aumentar o risco de explosão e de combustão espontânea.

Importa referir que esses sistemas de drenagem apresentam uma problemática que deve ser evitada durante a extração do biogás, e que é a formação de condensados que contaminam o biogás recolhido. Este fenómeno pode ocorrer porque o biogás proveniente do aterro encontra-se a temperatura muito elevada e durante a sua extração pelos sistemas de captação, arrefece ocorrendo a condensação dos componentes mais pesados do gás que são líquidos a temperaturas próximas da temperatura ambiente. Esse condensado formado pode ser arrastado sob a forma de aerossol pelo caudal de biogás, e vai ter efeitos negativos nos sistemas de valorização energética nomeadamente as câmaras de combustão das turbinas ou de motores. Os métodos que estão ao nosso dispor para impedir que esse fenómeno aconteça são: descarregar os condensados no sistema de esgoto público, descarregar estes condensados em sistemas de tratamento adequados (ETARs) e recirculação do lixiviado para promover a sua evaporação e degradação microbiana. O controle desse condensado é feito a partir do sistema de captação de biogás, onde são usados tubos que facilitam a purga do líquido para sistemas de recolha apropriados (Tchobanoglous, 2012).

Sobre a recuperação de energia proveniente do biogás de aterro sanitário, Themelis e Ulloa (2007) referem que em 2001, esta operação foi realizada em cerca de 955 aterros sanitários distribuídos por todo mundo. Os países com maior aplicação desta tecnologia foram os EUA (Estados Unidos da América), seguidos da Alemanha, dados estes que podemos confirmar na figura 2.15 que se segue.



**Figura 2.15** - Países com usinas de aterro (Themelis; Ulloa, 2007).

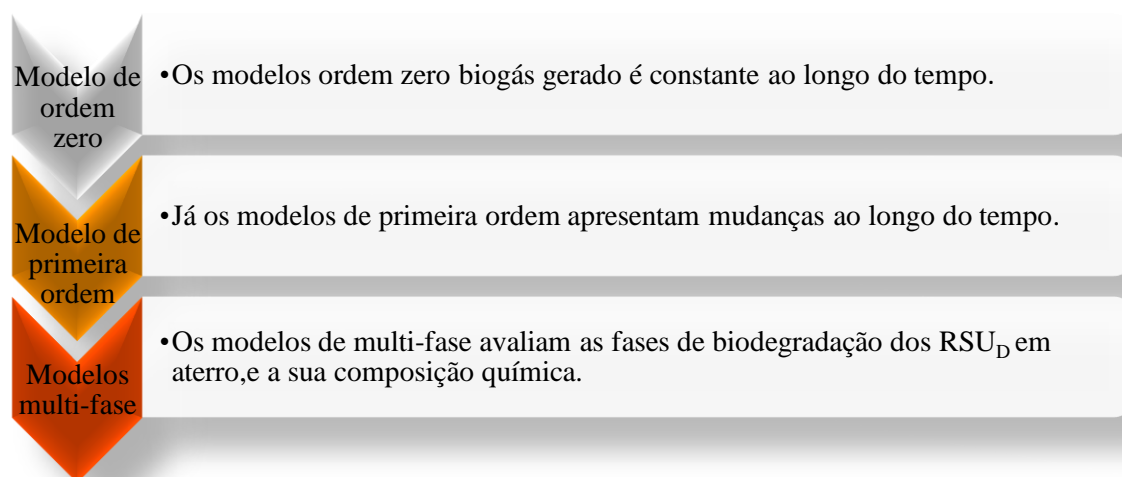
Nesta lógica, Themelis e Ulloa (2007) descrevem com precisão a instalação de valorização de biogás situada no aterro sanitário de Puente Hills, Los Angeles, EUA, conhecida como a maior a nível mundial, chegando a produzir 50 MW de potência elétrica.

Entretanto Moya et al., (2017) frisam que a produção do biogás de aterro tem causado um impacto significativo para o meio ambiente, pois apesar desse biogás ser rico em metano, que representa  $75\text{Nm}^3$ , só uma fração inferior a 3% desse biogás é aproveitada para produção de energia elétrica e calor, em sistemas de cogeração.

## 2.5 MODELOS PREVISÕES DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

A previsão da produtividade de biogás de aterro é de fundamental importância para o gestor de aterro, de forma a rentabilizar melhor o seu recurso energético (Kamalan, 2016).

Portanto, os modelos de previsão de biogás em aterro sanitário são baseados em modelos matemáticos, que visam avaliar a produção do biogás tendo em conta as variáveis que mais influenciam os processos, e os parâmetros que definem a influência de cada variável no processo global. Como se pode observar na figura 2.16, estes modelos podem ser classificados em função das suas características e complexidade, nomeadamente se consideram tempo após a deposição do resíduo em aterro ou outros fatores como a composição química dos RSUs (Scharff; Jacobs, 2006).



**Figura 2.16** - Classificação dos modelos de previsão.

### 2.5.1 MODELOS DE ORDEM ZERO

Neste tipo de modelo não é considerado o tipo de resíduo colocado em aterros, o que faz com que o seu grau de confiabilidade seja mais reduzido do que modelos mais complexos, e fazendo com que a sua sensibilidade a características específicas do aterro seja baixa e apresentando uma margem de erro até 44%. A Alemanha usa o modelo de ordem zero EPER (Kamalan, 2016) e (Scharff; Jacobs, 2006), que normalmente é definida pela equação 1:

$$M_e = M \times BDC \times BDCF \times F \times D \times C \quad (1)$$

Onde,

$M_e$  = Produção de metano ano ( $m^3$ /ano);

$M$  = Massa de resíduo depositado anualmente (t resíduo/ano);

$BDC$  = Proporção de carbono biodegradável (0,15);

$BDCF$  = Proporção de carbono biodegradável convertido (0,5);

$F$  = Fator de conversão do carbono em metano (1,33) ( $t\ CH_4/t\ C$ );

$D$  = Eficiência de recolha (0,4 para desgaseificação ativa, 0,9 se não existir recuperação e 0,1 para uma recolha ativa de biogás com cobertura);

$C$  = Concentração de metano 0,50%.

Entretanto Kamalan; Sabour; Shariatmadari, (2011), propuseram um outro modelo de previsão de ordem zero que foi desenvolvido pela Solid Waste Association of North América (SWANA), e é definida pela seguinte equação 2:

$$Q = \frac{Ml_0}{(t_0 - t_f)} \quad (2)$$

Onde,

$Q$  = Produção de metano por ano ( $m^3$ /ano);

$M$  = Quantidade de resíduo depositado (t);

$l_0$  = Potencial de geração de metano ( $m^3$  de  $CH_4$ /ton. resíduo).

Contudo a diferença entre o tempo inicial ( $t_0$ ) e tempo final ( $t_f$ ), está relativamente ligada ao tempo em que o resíduo foi depositado, à geração de biogás e ao tempo em que termina a geração de biogás (Drive, 1997).



### 2.5.2 MODELOS DE PRIMEIRA ORDEM

Os modelos de primeira ordem são os modelos mais utilizados para fazer a previsão da produção de biogás de aterro. Pelo facto de terem em conta a influência do tempo na produção de biogás, nomeadamente as variações previsíveis como o decaimento da produção de biogás ao longo do tempo, ou as emissões de biogás logo após a deposição do resíduo no aterro, estes modelos permitem atingir previsões mais próximas do que será o comportamento real ao longo do período de vida do aterro (Oonk, 2010). O modelo (IPCC) Intergovernmental Panel on Climate Change, lançado em 1996 encontrava-se nos modelos de ordem zero, porque continha alguns parâmetros presentes que são utilizados nos modelos de ordem zero (Kamalan; Sabour; Shariatmadari, 2011). Já em 1997, o modelo IPCC sofreu modificações passando a ser considerado um modelo de primeira ordem, por estimar a captação de CH<sub>4</sub> produzido a partir de resíduos depositados no aterro em um único ano. Deste modo, ele não foge da realidade de outros modelos de previsão de biogás para aterros sanitários que permite calcular a quantidade de biogás metano produzido no ano, que por vezes é emitido para a atmosfera, e é definida pela equação 3 (Santos; Romanel; Van Elk, 2017).

$$CH_4 = \sum_{i=1}^t (A \times K \times RSU_D(x) \times RSU_{Df}(x) \times L_o \cdot e^{(-k \cdot (t-x))}) \quad (3)$$

Onde,

$CH_4$  = Produção de biogás metano no ano (m<sup>3</sup> /ano);

$RSU_{Df}$  = Fracção de resíduos sólidos efetivamente depositado no aterro “x” (%),

$RSU_D$  = Total de resíduos depositados até ao ano x (ton/ano);

$A = (1 - e^{-k})/k$ ; factor de normalização para corrigir a soma;

$L_o$  = Potencial de geração de metano no ano (ton. de CH<sub>4</sub>/ton. de resíduo);

$k$  = Taxa de geração de metano (ano<sup>-1</sup>);

$t$  = Tempo após a deposição (ano);

$x$  = ano de contribuição desde o início das atividades do aterro até o ano “t”.

Já o IPCC (2006), na sua última publicação, concluiu que o modelo feito em 1996 se trata de um modelo de ordem zero, porque não apresenta resultados mais precisos no que concerne a estimativa de produção de metano, sendo que o modelo de primeira ordem apresenta resultados mais reais, que por sua vez é obtida pelas equações 4,5,6,7 e 8:

$$CH_4 = (\Sigma \times CH_4(X, T) - R(T)) \times (1 - OX(T)) \quad (4)$$

$$CH_4 = CODDm(decomp)_T \times F \times \frac{16}{12} \quad (5)$$

$$CODDm(decomp)_T = CODDma_{T-1}(1 - e^{-k}) \quad (6)$$

$$CODDma_X = CODDmd_T + (CODDma_{T-1} \times e^{-k}) \quad (7)$$

$$CODDmd_T = M \times COD_T \times COD_f \times FCM_T \quad (8)$$

Onde,

$CH_4$  = Produção de biogás metano no ano (Gg/ano);

$CODDm(decomp)_T$  = Massa de carbono orgânico degradável decomposto no aterro no ano T (Gg);

$F$  = Fração de metano em volume no biogás;

$\frac{16}{12}$  = Relação de peso molecular entre o metano e o carbono;

$CODDma_{T-1}$  = CODDm acumulado no ano T-1(Gg);

$CODDma_T$  = CODDm acumulado no aterro no ano T (Gg);

$CODDmd_T$  = CODDm depositado no aterro no ano T (Gg);

$M$  = Massa de resíduos depositado no aterro no ano T (Gg);

$COD_T$  = Fração de carbono orgânico degradável no ano T (Gg C/Gg de resíduos);

$COD_f$  = Fração de carbono orgânico degradável que pode ser decomposta;

$FCM_T$  = Fator de correção de metano para o ano deposição;

$k$  = constante de geração de metano (ano<sup>-1</sup>);

$R$  = Recuperação de metano no ano;

$OX$  = Fator de oxidação no ano;

$T$  = Tempo após a deposição;

$X$  = Razão de matéria orgânica/categoria de resíduo.

A fração de Carbono Orgânico Degradável (COD), é encontrada através da média dos contributos para este parâmetro atribuíveis aos diferentes componentes dos RSUs depositados em aterro. Podem observar-se na tabela 2.7 os valores de COD sugeridos pelo IPCC como sendo as contribuições dos diferentes componentes tipicamente encontrados em RSUs.

**Tabela 2.7 - Valores COD recomendado pelo IPCC (Adaptado do IPCC, 2006).**

<b>Componentes</b>	<b>COD (%)</b>
Resto de alimentos	15
Madeira e palha	43
Jardim	20
Têxteis	24
Lama de esgoto	5
Resíduos industriais	15
Papeis e papelão	40

O fator de Correção do Metano (FCM), é um fator que visa corrigir o valor de produção de metano tendo em conta as características de infraestruturas do aterro ou de qualquer outro local de destino dos RSU, e a sua modalidade de operação na medida em que estas características afetam decisivamente o processo de degradação e, portanto, a produção de biogás. Apresentam-se na tabela 2.8 os valores de FCM propostos pelo IPCC para diferentes tipologias de local de deposição dos resíduos, onde se pode ver que quanto melhores forem as condições que asseguram a anaerobiose maior o valor do FCM pois é expectável que a produção de biogás seja favorecida.

**Tabela 2.8 - Valores FCM de acordo com local (Adaptado do IPCC, 2006).**

<b>Local de deposição</b>	<b>FCM (valores padrões)</b>
Controlado – Anaeróbio	1,00
Controlado – Semi-anaeróbio	0,50
Não Controlado – Fundo (>5m de lixo)	0,80
Não Controlado – Fundo (<5m de lixo)	0,40
Aterros não categorizado	0,60

Já no que diz respeito à constante de geração do metano (k), na ausência de valores de caracterização experimental deste parâmetro, o IPCC recomenda a utilização dos valores apresentados na tabela 2.9

que relacionam os valores assumidos pela constante de geração do metano (k) com as condições ambientais no local de implantação do aterro bem como com a natureza e biodegradabilidade do material nele depositado.

**Tabela 2.9** - Valores de k de acordo com o clima da região e o lixo (IPCC, 2006).

Tipo de Lixo		Zona Climática							
		Boreal e Temperado (TAM<20°C)				Tropical (TAM>20°C)			
		Seco (PAM/PE<1)		Húmido (MAP/PE>1)		Seco (PAM/PE<1)		Húmido (MAP/PE>1)	
		Padrão	Variação	Padrão	Variação	Padrão	Variação	Padrão	Variação
Lixo Rapidamente degradável	Comida e Lodo do esgoto	0,06	0,05-0,08	0,185	0,1-0,2	0,085	0,07-0,1	0,04	0,17-0,7
Lixo moderadamente degradável	Restos de poda	0,05	0,04-0,06	0,1	0,06-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2
Lixo lentamente degradável	Papel e tecido	0,04	0,03-0,05	0,06	0,05-0,07	0,045	0,04-0,06	0,07	0,06-0,085
	Madeira e palha	0,02	0,01-0,03	0,03	0,02-0,04	0,025	0,02-0,04	0,035	0,03-0,05
Móveis, caixas, colchões, eletrodomésticos, etc.		0,05	0,04-0,06	0,09	0,08-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2

O modelo TNO foi desenvolvido pela Netherlands Organisation for Applied Scientific Research e permite calcular a produção de biogás gerado em aterro, com base em informações sobre o conteúdo de carbono orgânico existentes nos resíduos. É definido pela equação 9 (Scharff e Jacobs, 2006).

$$\alpha_t = \zeta 1,87 A C_0 k_1 e^{-k_1 t} \quad (9)$$

Onde,

$\alpha_t$  = Produção do biogás metano ano (m<sup>3</sup> /ano);

$\zeta$  = fator de fracionamento (0,58);

1,87= Fator de conservação (m<sup>3</sup>/kg C degradado);

A= Quantidade de resíduos depositado (t);

C<sub>0</sub>= Quantidade de carbono orgânico presente no resíduo (kg C/t resíduo);

k<sub>1</sub>= Taxa constante de degradação 0,094 (ano<sup>-1</sup>);

t = Tempo após a deposição (ano).

O modelo de USEPA foi o primeiro modelo criado pela United States Environmental Protection Agency com o fim de prever a produção de gás metano em aterros e foi apresentado pelo documento AP-42 (Compilation of Air Pollutant Emission Factors). Neste modelo estabelecem-se duas formas de prever a produção de biogás (Santagelo, et. al, 2012), sendo a primeira fazer previsão em aterros onde é realizada deposição sem controle e em aterros controlados, utilizando a equação:

$$CH_4 = L_0 R (e^{-kC} - e^{-kt}) \quad (10)$$

Onde,

$CH_4$  = Produção de metano no ano ( $m^3$ /ano);

$L_0$  = Potencial de geração de metano ( $m^3$ /ton. Resíduo),

$R$  = Taxa de deposição média anual de resíduo durante a vida útil do aterro (ton/ano);

$k$  = Taxa de geração de metano constante ( $ano^{-1}$ );

$C$  = Tempo desde fechamento do aterro, ano; ( $c = 0$ , para aterro ativo);

$t$  = Tempo desde o início de deposição de resíduo, ano.

Como indicado na equação, o valor  $c$  será igual a 0, enquanto o aterro estiver a receber resíduos. O que significa dizer que o termo  $e^{-kC}$  será igual a 1.

O modelo LandGEM v03.02, é um modelo de previsão desenvolvido pela USEPA (United States Environmental Protection Agency). Este modelo permite obter resultados da produção de biogás de aterro, concretamente o biogás metano, dióxido de carbono, COVNM (composto orgânico volátil não metânico) e outros poluentes gerados num determinado aterro ou lixeira.

A ferramenta apresentada pela USEPA, parte do pressuposto que a composição dos RSU, apresenta quantidades comparáveis de materiais rapidamente biodegradáveis, lentamente biodegradáveis e inertes, calculando a curva de produção de metano a partir da quantidade total de resíduos sólidos depositados em aterro (Alexander; Burklin; Singleton, 2005).

Os padrões do CAA (Clean Air Act), com base em regulamentos estabelecidos para aterros sanitários, são normas que avaliam se um determinado aterro está a seguir ou a cumprir os requisitos. Assim, para analisar a produção do biogás metano de um determinado aterro sanitário, na falta de valores reais, é recomendado o uso de valores estabelecidos pela AP-42 (Compilation of Air Pollutant Emission Factors), e como não difere muito dos modelos de primeira ordem, considera o total de resíduo depositado por ano, sem ter em conta a fração orgânica existente no mesmo. Este modelo é definido pela equação 11 (Kumar; Sharma, 2014).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 KL_o \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (11)$$

Onde,

$Q_{CH_4}$  = Quantidade de metano produzido ano ( $m^3$  /ano);

$i = 1$  tempo em anos a ser incrementado;

$n = 1$  ano inicial de aceitação do resíduo;

$j = 0,1$  tempo em anos a ser incrementado;

$k$  = taxa de geração de metano constante ( $ano^{-1}$ );

$M_i$  = Massa de resíduo sólido depositado no ano  $i$  (ton/ano);

$L_o$  = Potencial de geração de metano ( $m^3$  de  $CH_4$ /ton. resíduo);

$t$  = Tempo após a deposição (ano).

O modelo Francês EPER, permite-nos adquirir resultados de geração do biogás de aterro utilizando duas abordagens distintas, que por sua vez dependem da entidade gestora do aterro (Scharff; Jacobs, 2006):

- Na primeira abordagem estima-se a produção de biogás em células de aterro ligadas por um sistema de recuperação do biogás de aterro, utilizando dados da recuperação do biogás de aterro registados pela entidade gestora do aterro, e esta abordagem baseia-se na equação 12:

$$A = F \times H \times (CH_4) \quad (12)$$

Onde,

$A$  = Quantidade de metano produzido ano ( $m^3$  de  $CH_4$ /ano);

$F$  = Taxa de extração de metano ( $m^3$ /hora);

$H$  = Horas de funcionamento do compressor (h/ano);

$CH_4$  = Concentração de metano ( $m^3/m^3$ ).

- A segunda abordagem (que se adapta melhor ao aterro dos Mulenvos, ASM), permite estimar a geração de metano para células de aterro ligadas ou não a um sistema de recuperação de biogás de aterro, utilizando o modelo multifásico desenvolvido pela ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) em (Coordination, 2012). Esta abordagem é definida pela equação 13:

$$FE_{CH_4} = \sum_x FE_o \times \left( \sum_{1,2,3} A_i \times p_i \times k_i \times e^{-k_i t} \right) \quad (13)$$

Onde,

$FE_{CH_4}$  = Produção de metano ano ( $m^3$ /ano);

$FE_o$  = Potencial de geração de metano ( $m^3$  de  $CH_4$ /ton. resíduo);

$A_i$  = Factor de normalização

$p_i$  = Fração de resíduo com a taxa de degradação  $k_i$  ( $kg_i/kg$  resíduo);

$k_i$  = Taxa de degradação da fração constante ( $ano^{-1}$ );

$t$  = Tempo após a deposição (ano).

O modelo mexicano é um modelo de primeira ordem, que assume um período de um ano entre a deposição do resíduo e a produção do biogás de aterro. O modelo assume que a produção de metano diminui exponencialmente à medida que a fração orgânica de resíduo é consumida (Kamalan; Sabour; Shariatmadari, 2011). Neste modelo, a geração de metano é obtida pela equação 14:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n 2KL_o M_i e^{-k_i t} \quad (14)$$

Onde,

$Q_{CH_4}$  = Produção de metano ano ( $m^3$ /ano);

$i = 1$  tempo em anos a ser incrementado;

$n = 1$  ano inicial de aceitação do resíduo

$k$  = Taxa de geração de metano constante ( $ano^{-1}$ );

$M_i$  = Massa de resíduo sólido depositado ano  $i$  (ton/ano);

$L_o$  = Potencial de geração de matano ( $m^3$  de  $CH_4$ /ton. resíduo);

$t$  = Tempo após a deposição (ano).

Para as equações 2,3, 9,10,11,13 e a 14, os valores do potencial de geração de metano ( $L_o$ ) e da taxa de geração de metano ( $k$ ) dependem das características de biodegradabilidade dos resíduos (Borba, 2006). Assim sendo as tabelas 2.10 e 2.11 mostram os valores potenciais de geração de metano e da taxa de geração de metano.

**Tabela 2.10** - Valores de *k* com base a precipitação anual (Borba, 2006).

Precipitação Anual	Valores de <i>k</i>		
	Inerte	Lentamente degradável	Rapidamente degradável
<250mm	0,0	0,02	0,03
>250 e <500mm	0,01	0,03	0,05
>500 e <1000mm	0,02	0,05	0,08
>1000mm	0,02	0,06	0,09

**Tabela 2.11** - Valores de *Lo* com base as características dos RSUs (Borba, 2006).

Caraterísticas do lixo	Valor Mínimo para <i>Lo</i>	Valor Máximo para <i>Lo</i>
RSU Inerte	5	25
RSU Lentamente Degradável	140	200
RSU Rapidamente Degradável	225	300

Como podemos verificar nas tabelas 2.10 e 2.11 que os valores de *k* variam entre 0,01 até 0,09 anos<sup>-1</sup>, e para *Lo* os valores aceitáveis variam entre 125 até 300 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t de resíduo.

### 2.5.3 MODELO DE MULTIFASE

O modelo de multifase é abordado como uma alternativa mais completa do modelo de primeira ordem segundo a visão de Oonk (2010). Essa abordagem multifásica requer informação detalhada sobre o conteúdo de carbono e qualidade de carbono de numerosas categorias de resíduos. Esta informação pode não estar disponível de forma fiável, ou estar apenas parcialmente disponível (Oonk, 2010). Já na visão de Kamalan; Sabour; Shariatmadari (2011), afirma-se que a diferença principal entre o modelo de primeira ordem e o modelo multifase reside no uso de muitas equações da primeira ordem ao mesmo momento, para as diferentes frações componentes dos resíduos depositados, refletindo a taxa de decomposição em cada fração e portanto o seu contributo para a geração de biogás.



O modelo Afvalzorg é um modelo de multifase desenvolvido pela NV Afvalzorg nos países baixos (Holanda), e baseia-se na combinação de literatura e experiência própria com relação a geração de biogás de aterro (Oonk, 2010). Na previsão de geração do biogás de aterro, o modelo Afvalzorg considera oito categorias de resíduos e três frações, onde cada fração é contemplada separadamente de forma a estimar com maior precisão a produção do biogás de aterro. O modelo Afvalzorg contém análise multifásica, de forma a contemplar as diferentes frações presentes nos resíduos, ou seja, considerando que a degradação do resíduo envolve processos múltiplos desde os mais lentos até aos mais rápidos. Este modelo é definido pela equação 15 (Scharff; Jacobs, 2006).

$$\alpha_t = \zeta \sum_{i=1}^3 cAC_{o,i}k_{1,i}e^{-k_{1,i}t} \quad (15)$$

Onde,

$\alpha_t$  = Produção de metano ano ( $m^3$ /ano);

$\zeta$  = Factor de fraccionamento;

$i$  = Fração do resíduo com uma taxa de degradação  $k_{1,i}$  ( $kg_i/kg_{resíduo}$ );

$c$  = Factor de conversão com valores entre 0,7 até 0,74 ( $m^3$ biogás/ $kg_{M.O}$  degradado);

$A$  = Quantidade de resíduos depositado (t);

$C_0$  = Quantidade de matéria orgânica (M.O) presente no resíduo ( $kg_{M.O}/t$  resíduo);

$k_{1,i}$  = Taxa de degradação constante da fração  $i$  ( $ano^{-1}$ );

$t$  = tempo após a deposição (ano).

O modelo GasSim Lite v1.05 foi desenvolvido pela Golder Associates of Environment Agency of England and Wales e consiste em permitir prever a geração do biogás através da fração biodegradável de carbono num dado espaço de tempo (Tchobanoglous, 2012). Este modelo apresenta um decaimento semelhante ao previsto pelos modelos de primeira ordem e obtêm-se resultados a partir de um programa ou de uma forma manual (empírica), precisando apenas da entrada de resíduo e a degradação específica durante o ano (Kamalan; Sabour; Shariatmadari, 2011). Assim, a produção do metano é obtida pelas equações 16 e 17 (Tchobanoglous, 2012).

$$C_t = C_0 - (C_{o,1}e^{(-k_1t)} + C_{o,2}e^{(-k_2t)} + C_{o,3}e^{(-k_3t)}) \quad (16)$$

$$C_x = C_t - C_{t-1} \quad (17)$$

Onde,

$C_t$  = Massa (t) de carbono degradável até ao tempo  $t$ ;

$C_0$  = Massa (t) de carbono degradável em  $t = 0$ ;

$C_{o,i}$  = Massa (t) de carbono degradável  $t = 0$ , para cada fração (1,2 e 3 correspondendo a fração biodegradável desde a mais lenta até a mais rápida);

$C_x$  = Massa (t) de carbono num ano  $t$ ;

$t$  = tempo em anos entre a deposição e a geração do biogás;

$k_i$  = Constante da taxa de degradação para cada fração de carbono degradável (ano);

A seleção do modelo a utilizar na análise da produção de biogás numa instalação concreta de aterro deve portanto ter em consideração as condições reais de operação e as características da instalação, tipo de equipamentos utilizados, bem como a variabilidade na composição dos resíduos e o acesso a informação sobre estes parâmetros de forma a selecionar de forma crítica um modelo de cálculo que permita fazer uma avaliação realística da produtividade de biogás e da viabilidade de se efetuar a sua recolha e valorização energética.

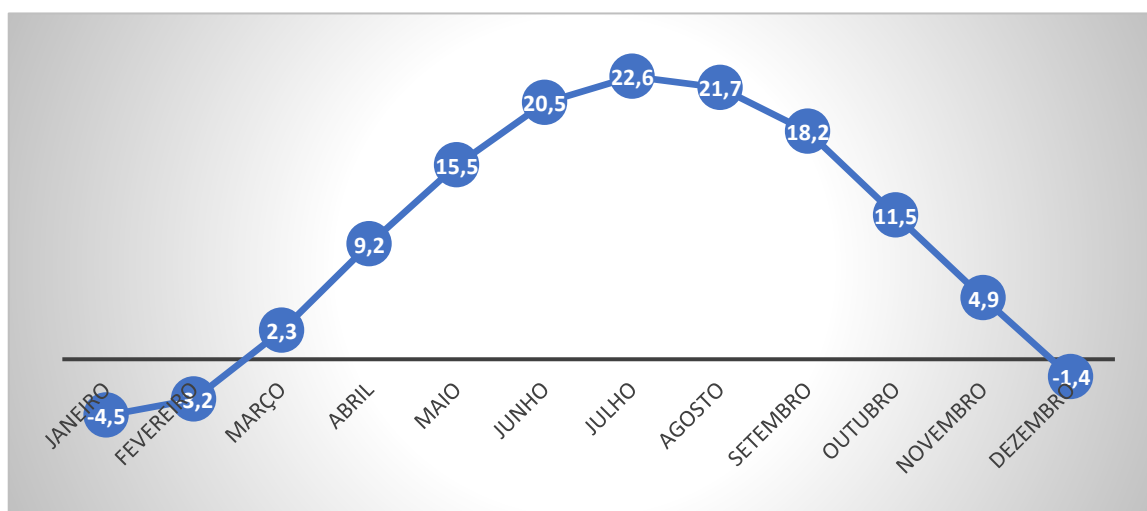
## CAPÍTULO 3. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E ECONÓMICO DE ANGOLA

Neste capítulo procurou-se fazer um enquadramento geográfico e económico do país em que o estudo empírico irá decorrer, respetivamente Angola, de forma a se obter uma informação mais ampla sobre o seu contexto.

### 3.1 SITUAÇÃO GEOGRÁFICA

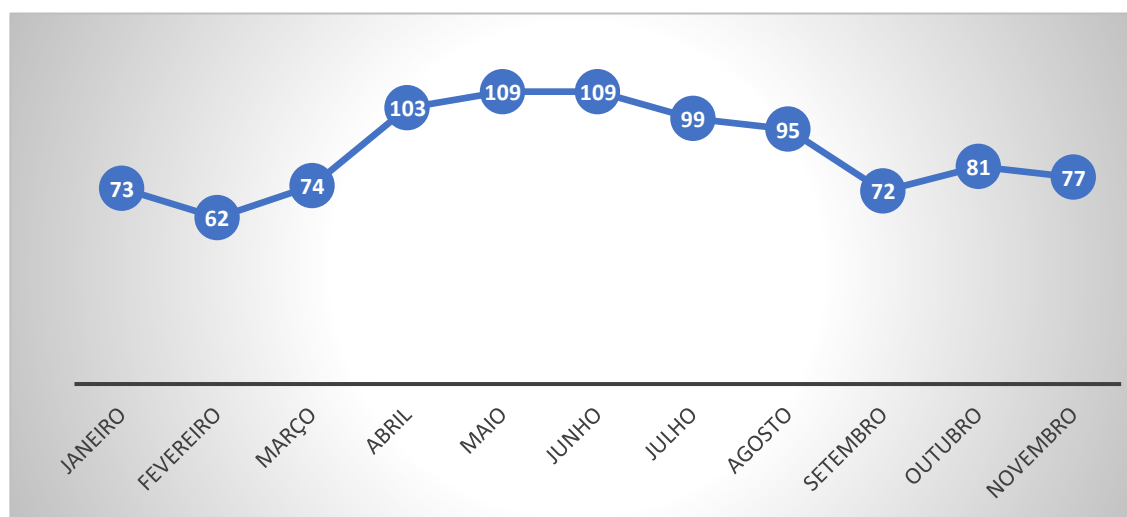
Segundo o Instituto Nacional de Estatística angolano, Angola encontra-se situada no Sudoeste do continente africano, possui 18 províncias, com 163 municípios e 475 comunas, dispondo assim de uma área territorial perto de 1.246.700 km<sup>2</sup>. O censo populacional realizado em 2014, aferiu que a densidade populacional era de 24.383.301 habitantes, dos quais 62,4% encontram-se concentrados nos grandes centros urbanos do país. Desde então, vem-se registando um crescimento populacional atingindo-se os 29.608.109 habitantes em 09 de setembro de 2020. Importa realçar que não obstante a língua oficial ser o Português existem no país vários grupos etnolinguísticos, expressando-se em quarenta e duas línguas nacionais, sendo as línguas maternas da maioria da população o Kimbundo, Kikongo, Fiote, Kwanyama, Umbundo, Mbunda, Nganguela, Nhaneca e o Tchockwe.

Relativamente ao clima, Angola apresenta diversas características climáticas que vão desde as temperadas às tropicais, dependendo da região considerada. Na figura 3.17 podemos verificar as temperaturas médias com base nos meses do ano, em Angola.



*Figura 3.17 - Temperatura (°C) média em Angola (Climate-Data.Org, 2020).*

Como se pode observar, na figura acima, Angola apresentou uma temperatura média máxima de 22.6 °C registada no mês de julho e a temperatura média mínima de -4.5°C registada no mês de janeiro, sendo a temperatura média anual de 9.2°C. No entanto, o país apresenta uma precipitação média anual bastante aceitável, como podemos observar na figura 3.18.



**Figura 3.18** - Precipitação média (mm) (Climate-Data.Org, 2020).

De acordo a figura 3.18 verifica-se uma precipitação média anual de 917 mm, e o mês com menos pluviosidade é o mês de fevereiro que apresenta uma precipitação média de 62 mm. Os meses de maio e junho registam a maior pluviosidade com uma precipitação média de 109 mm.

### 3.2 ENQUADRAMENTO MACROECONÓMICO

Segundo a Deloitte (2020), nos últimos anos Angola vem vivendo um contínuo ambiente de insegurança económica, que advém maioritariamente da significativa queda do preço do barril de Petróleo nos mercados internacionais. Atendendo ao fato de que Angola é um país visivelmente petro-dependente, com a queda do preço do barril, a principal fonte de arrecadação de divisas começou a escassear, prejudicando deste modo as importações das quais o país é largamente dependente (apesar das iniciativas do executivo realizadas no setor não petrolífero). Esta situação aliada aos impactos negativos da pandemia de COVID-19 na economia, traduziu-se num crescimento real negativo (de cerca de 2,6% em 2016, 0,15 em 2017 e 1,2% em 2018) que afeta os rendimentos das famílias, a taxa de desemprego e os níveis de poupança pública. Esta é uma situação que urge contrariar pois condiciona o consumo, a produção e o investimento.

Deste modo o Executivo angolano, prevê para 2020 uma recessão de aproximadamente 1,21% do PIB, resultante da expectativa de redução da produção petrolífera em 0,17%, combinada com uma redução do PIB não petrolífero em 0,98% (Minfin 2020). E o Fundo Monetário Internacional, também prevê uma recessão em 2020, equivalente a uma taxa de crescimento real negativo de (-4,0%). Assim sendo, ainda se estima uma luz no fundo do túnel para a retoma do crescimento do PIB em 2021, em torno de 3,2% (Deloitte 2020). Os fatores recessivos associados à pandemia são conjunturais tanto em Angola como no resto do Mundo pelo que serão progressivamente ultrapassados em anos futuros, no entanto, a dependência económica do setor petrolífero já é um fator de ordem estrutural que é importante abordar de forma a proteger a economia angolana das flutuações deste mercado sectorial.

Em consequência da redução do preço de petróleo no mercado internacional, mas também pelo baixo investimento nos segmentos de crescimento de prospeção, pesquisa e exploração, e pela ineficiência dos sistemas de recuperação secundária têm também sido desativados alguns poços de petróleo, o que também contribui para uma redução na produção de petróleo e consequentemente uma redução do PIB. Concretamente, a contribuição do petróleo e gás para o PIB teve uma queda de 6% em 2015, e de 10% em 2018. A taxa de crescimento da atividade petrolífera foi de -2,6% em 2014 e de -9,5% em 2018 o que ilustra a contração deste setor.

Porém, no setor não petrolífero, o setor de energia elétrica é o que tem apresentado melhor desempenho em termos de crescimento em volta dos 17% em 2014 e 22% em 2018 sobre o PIB, o que mostra uma tendência positiva de crescimento de sectores económicos alternativos e potencialmente mais sustentáveis (Deloitte 2020).

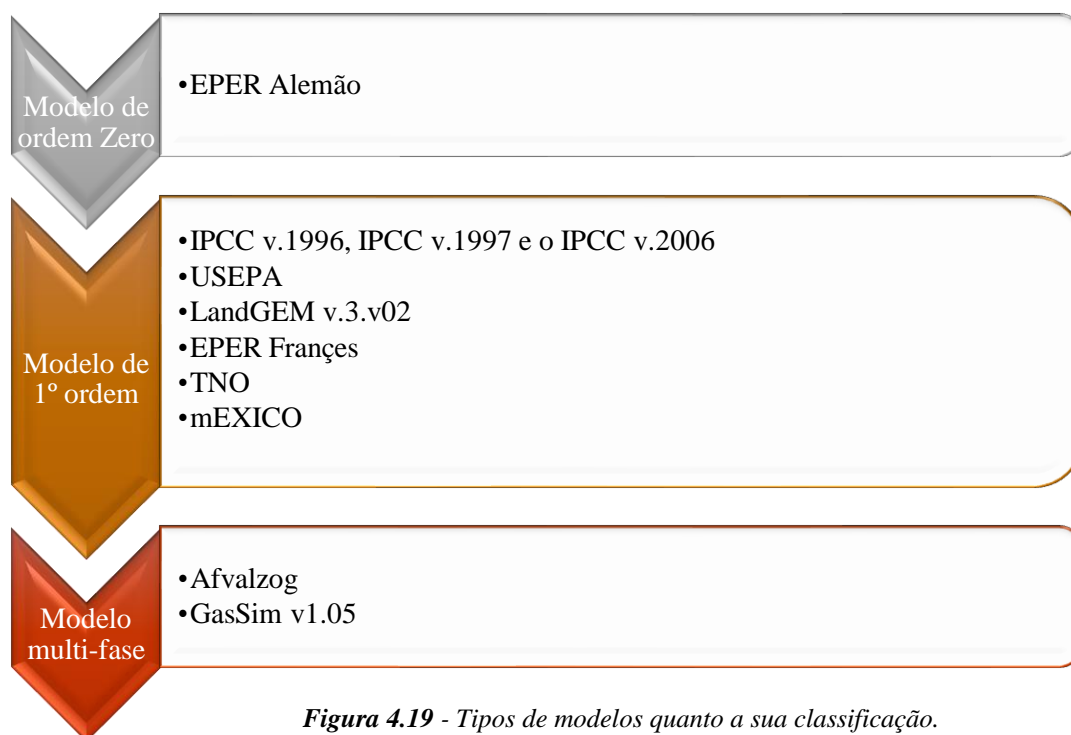
De modo geral, podemos afirmar que a economia de Angola nos últimos 3 anos consecutivos, vem apresentando uma constante recessão, e apoiando-se nas previsões do Executivo e do FMI, um quadro que tenderá a continuar até pelo menos ao ano de 2021.

## CAPÍTULO 4. METODOLOGIA

Neste capítulo procurou-se apresentar detalhadamente os modelos utilizados no trabalho, com o intuito de se alcançar o objetivo principal do trabalho.

### 4.1 MODELOS DE PREVISÃO

Com base na literatura supracitada podemos constatar que vários modelos permitem estimar o biogás proveniente de aterro, tal como relembra a figura 4.19.



*Figura 4.19 - Tipos de modelos quanto a sua classificação.*

Nesse segmento no presente trabalho, iremos analisar o aterro sanitário dos Mulenvos situado em Angola, concretamente na Província de Luanda, no município de Viana e pretende-se desde modo fazer uma análise comparativa, na qual se utilizarão dois modelos de previsão da produção de biogás que abordam de forma diferente esta tarefa. Os modelos selecionados são normalmente conhecidos como LandGEM v3.02 e IPCC v2006, e a sua utilização simultânea permitirá fazer uma avaliação comparativa e aferir qual deles será melhor adequado para descrever o potencial energético deste aterro. Assim sendo, para além da previsão da produtividade de gás de aterro enquanto recurso energético é imperativo estimar a sua conversão em energia através dos sistemas de cogeração (conversão de energia térmica para energia elétrica), visando a integração na rede nacional de transporte de eletricidade (RNT).

Portanto, com a finalidade de prever este mesmo recurso podemos verificar nos pontos seguintes a especificação da aplicação dos dados nos dois modelos de previsão (LandGEM v3.02 e IPCC v.2006), modelos esses escolhidos por serem os mais utilizados em termos de aterro sanitário a nível mundial, por permitirem a obtenção de resultados consistentes quanto à produção de biogás.

#### 4.1.1 MODELO LANDGEM V.3.02

Segundo Kumar e Sharma, (2014), é aconselhável a utilização do modelo LandGEM v.3.02, para lixeiras e aterros de forma a estimar o GEE e o potencial de recuperação de energia dos mesmos de modo ambientalmente sustentável. Por esta razão, foi um dos modelos escolhidos, acrescentando também o fato de apresentar bons resultados em estudos prévios (Bianek et al. 2017).

É importante frisar que este modelo também é utilizado pela EFACEC, empresa portuguesa com perfil fortemente exportador e presença internacional em mais de 65 países. Fundada em 1962 cujo o objeto social esta intrinsecamente ligado ao ramo energético nomeadamente: no fabrico de máquinas elétricas. O modelo LandGEN é um software que funciona em formato Excel, o que facilita posteriores análises e tratamentos dos resultados obtidos.

O primeiro passo para o seu funcionamento passa pela inserção do parâmetro concernente à deposição anual dos RSU depositados no aterro. Seguido de outros parâmetros como:

- O potencial de geração de metano ( $L_o$ ): encontrado através da caracterização do aterro e com o enquadramento teórico;
- Taxa de geração do metano ( $k$ ): teoricamente os valores vão de 0,01 a 0,09, porém o modelo orienta que é adequado utilizar 0,05. Segundo USEPA, (2004), o valor de  $k$  pode ser calculado a partir da equação 18.

$$k = 3,2 \times 10^{-5} \times P_{ma} + 0,01 \quad (18)$$

Onde,

$P_{ma}$  = Precipitação média anual (mm)

Sendo que a precipitação média anual em Angola, é de 917 mm;

- Percentagem de metano: levando em conta os aspetos teóricos, a concentração de metano presente no biogás vai a 45% a 60%, obtendo deste modo 50% que é recomendado pelo modelo;

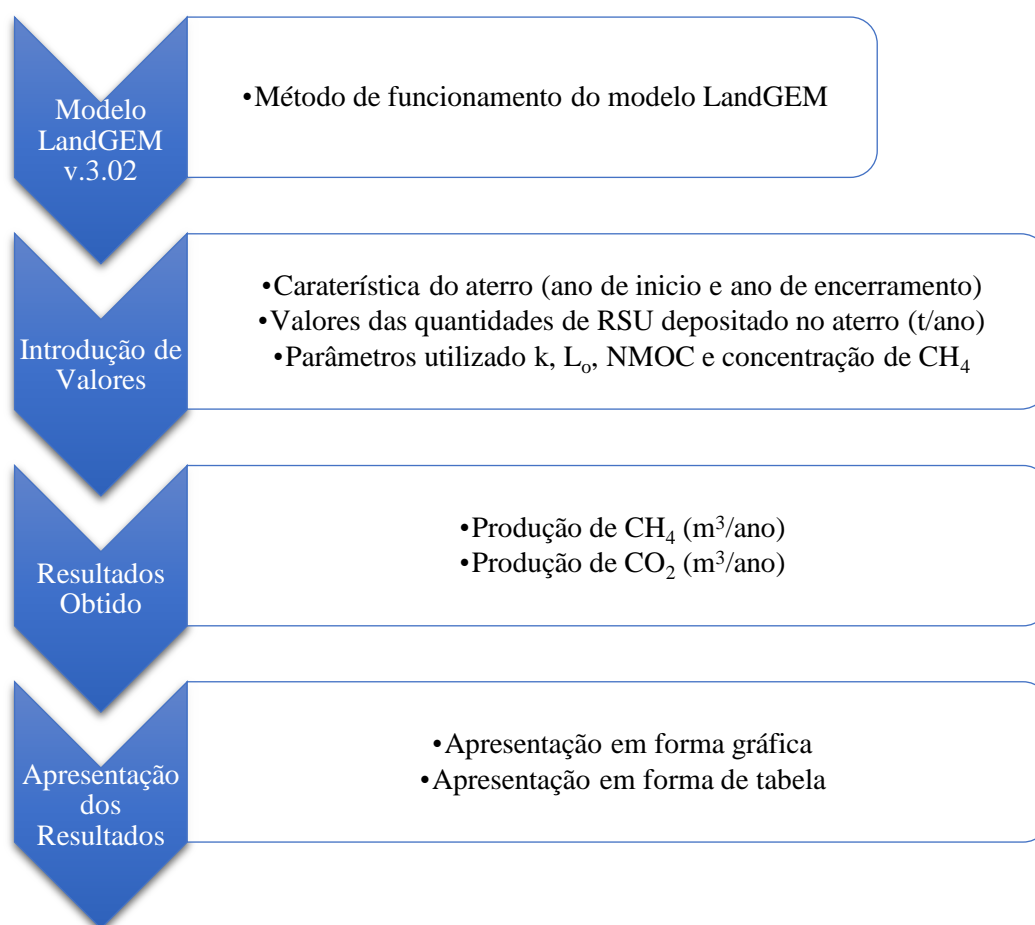
- Compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM): seguindo a orientação do modelo utilizou-se o valor de 4000 (ppmv como hexano).

Deste modo o modelo assume valores padronizados que são retirados da CAA (Clean Air Act) e que são apresentados na tabela 4.12.

**Tabela 4.12** - Parâmetros do Modelo LandGEM v3.02.

<b><i>k</i></b>	0,04
<b><i>L<sub>o</sub></i></b>	170 (m <sup>3</sup> de CH <sub>4</sub> / t)
<b>CH<sub>4</sub></b>	50%
<b>COVNM</b>	4000 (ppmv como hexano)

Este modelo permite obter resultados da produção volumétrica anual de CH<sub>4</sub> e o CO<sub>2</sub>, os principais constituintes do biogás de aterro. Os resultados são apresentados em formato de tabela e em representação gráfica. Importa salientar que o modelo fornece também resultados de outros poluentes em função do ano escolhido pelo utilizador ou gestor do aterro. A metodologia utilizada para obtenção de resultados com este modelo é descrita na figura 4.20.



**Figura 4.20** - Fluxograma de funcionamento do modelo LandGEM v.3.02



#### 4.1.2 MODELO IPCC V.2006

A escolha do modelo IPCC v.2006 como o segundo modelo de comparação para determinar a curva de produção de metano do ASM foi sustentada pelos bons resultados obtidos por Necker; Rosa, (2014), e Moreira (2010), na sua utilização.

Em termos comparativos a programação do modelo IPCC v.2006 permite a inserção de dados concernentes à composição dos RSUs depositados em aterro durante o período de funcionamento e já o modelo LandGEM apenas utiliza valores de quantidades de RSUs depositadas sem atender à sua composição específica. O modelo em questão apenas permite aquisição dos resultados do biogás metano produzido em cada ano.

Assim, a aplicação do modelo IPCC passa pela inserção de alguns parâmetros como:

- Fração de Carbono Orgânico Degradável ( $COD_f$ ): adotaram-se valores propostos pelo próprio modelo IPCC para diferentes frações de resíduos, como apresentado na tabela 4.13.

*Tabela 4.13 - Valores de  $COD_f$  com base na categoria de RSU.*

<b>Categoria dos RSU</b>	<b>Variação padrão</b>	<b>Valor utilizado</b>
<b>Resto de alimentos</b>	0,08-0,2	0,15
<b>Papel</b>	0,35-0,45	0,4
<b>Fraldas</b>	0,18-0,32	0,43
<b>Madeira</b>	0,39-0,46	0,24
<b>Têxteis</b>	0,2-0,4	0,24

- Fração de carbono orgânico degradável no ano ( $COD_T$ ): é um parâmetro que indica que nem todo o carbono orgânico contido no RSU irá degradar-se no período considerado, ou que a sua degradação será lenta. O valor recomendado pelo IPCC (2006), é de 0,5, uma vez que essa degradação ocorre em condições anaeróbias que demoram algum tempo a atingir e que dependem de fatores como temperatura, pH e composição do RSU;
- Taxa de geração de metano (k): baseia-se na composição dos resíduos depositados em aterro e na respetiva biodegradabilidade para avaliar o seu potencial de geração de metano. Na tabela 4.14 apresentam-se os valores de k adotados;

**Tabela 4. 14 - Valores de k para clima tropical húmido.**

<b>Categoria dos RSU</b>	<b>Valores padrão</b>	<b>Valores utilizado</b>
<b>Resto de alimentos</b>	0.1-0,2	0,185
<b>Papel</b>	0,05-0,07	0,06
<b>Fraldas</b>	0,05-0,07	0,06
<b>Madeira</b>	0,02-0,04	0,03
<b>Têxteis</b>	0,05-0,07	0,06

- Fator de correção do metano (FCM): O valor de FCM é atribuído de acordo com o local em que foi depositado, em que no nosso caso enquadra-se num aterro sanitário controlado. Conforme a tabela 2.8, o IPCC recomenda que se utilize para aterros controlados o valor de 1;
- Composição típica de RSU: é um dos parâmetros de extrema importância para determinar a curva de produção de metano, uma vez que o modelo prevê a produção de metano tendo em conta a contribuição de cada fração.

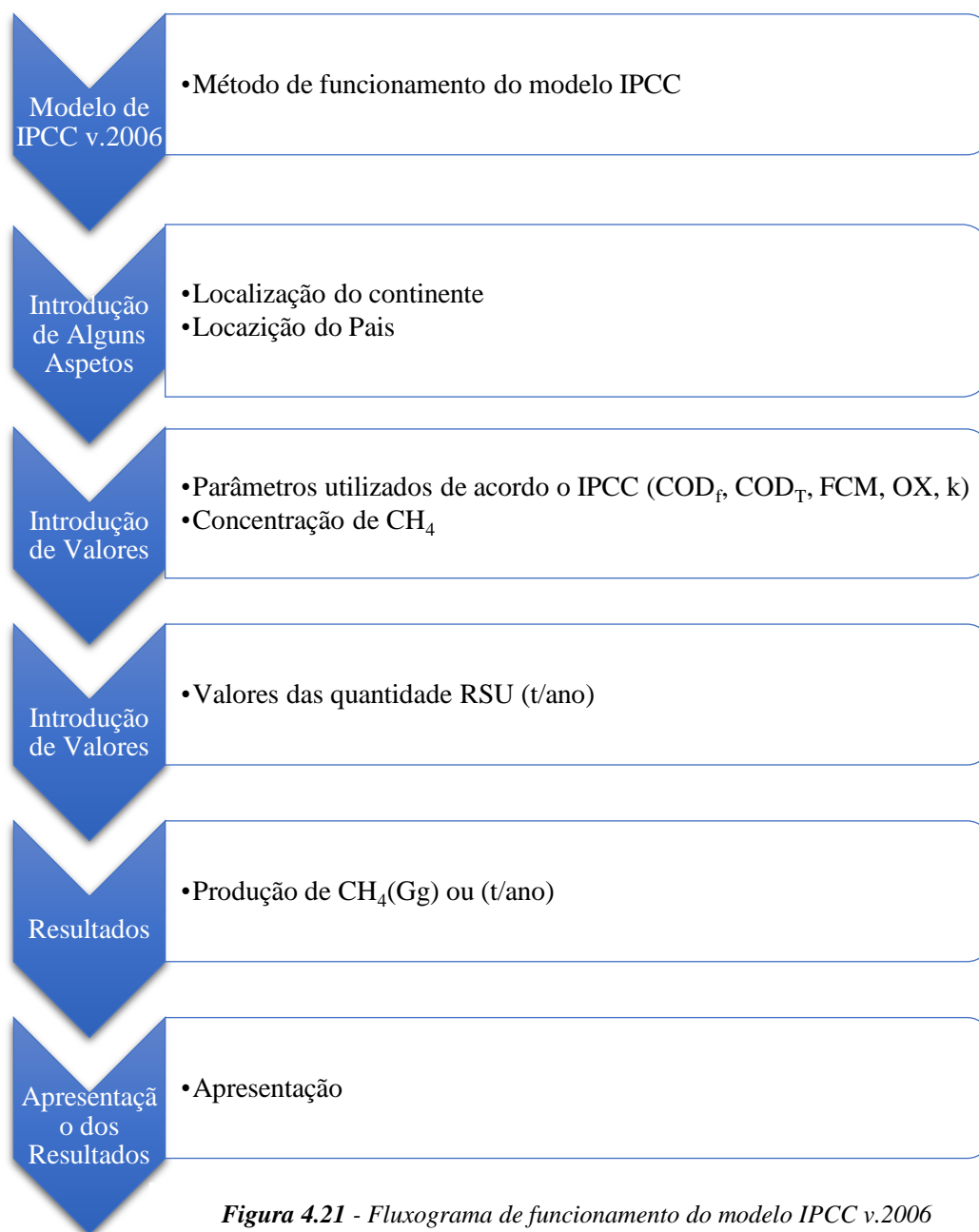
No entanto a tabela 4.15 apresenta a composição típica dos RSUs.

**Tabela 4.15 - Caracterização física dos RSUs deposita no ASM.**

<b>Categoria do RSU</b>	<b>%</b>
<b>Matéria orgânica</b>	25
<b>Plástico</b>	15
<b>Papel e cartão</b>	16
<b>Têxtil</b>	8
<b>Fraldas</b>	0
<b>Madeira</b>	0
<b>Outros</b>	22
<b>vidro</b>	7
<b>Metais</b>	7

Podemos verificar que o modelo avalia as distintas categorias de resíduos sólidos, desde os resíduos sólidos urbanos rapidamente biodegradáveis até aos inertes.

Em síntese, o modelo IPCC apresenta resultados concernente a concentração de metano contida no biogás em giga grama e a sua taxa de concentração de metano (F) é de 50%, valor este que é recomendado pelo modelo. A metodologia de obtenção dos resultados com o modelo IPCC v.2006 ilustra-se na figura 4.21.



**Figura 4.21** - Fluxograma de funcionamento do modelo IPCC v.2006

Uma vez que o modelo apresenta o resultado da produção de metano em Gg/ano, tomou-se em conta que 1Gg é igual  $10^6$  deforma, a converter em kg/ano.

## 4.2 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DO CAUDAL DE BIOGÁS METANO

Depois de se calcular a produção de biogás a partir dos modelos de previsão que são as ferramentas que permitem os gestores ou operadores de um aterro avaliar a quantidade de gases que podem ser potencialmente produzidos durante o período de vida útil de um aterro sanitário, é também relevante estimar a viabilidade da valorização energética deste biogás ou seja a sua conversão em Térmica ou energia elétrica.

Com base na literatura podemos saber que existem dois processos muito utilizados na valorização do biogás:

- Sistema de valorização energética realizada através de motores de combustão interna (MCI);
- Sistema de valorização energética realizada por turbinas a gás (CHP).

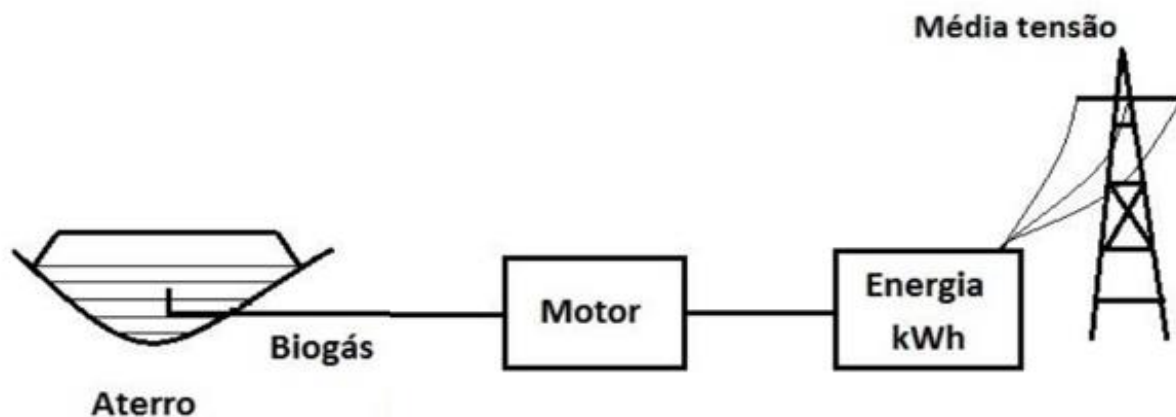
A escolha do sistema de valorização energética a utilizar foi realizado através da comparação destes dois sistemas possíveis, tendo em conta os parâmetros apresentados na tabela 4.16. Importa realçar que nos cálculos realizados não foram considerados o aproveitamento de gases de exaustão, neste caso para possível geração de energia térmica em um sistema de cogeração (CHP).

**Tabela 4.16** - Rendimentos dos sistemas de valorização energética Deublein; Steinhauser, (2008) e Pires, (2013)

<i>Sistemas de valorização</i>	<i><math>\eta_{elec}</math> (%)</i>	<i><math>\eta_{term}</math> (%)</i>
<b>Turbina a gás (CHP)</b>	33	50
<b>MCI a gás</b>	42	43

Como podemos observar na tabela 4.16 o sistema que apresenta melhor eficiência elétrica é o MCI, pois é-lhe atribuído um rendimento elétrico de 42% e um rendimento térmico inferior de 43%, enquanto a turbina a gás (CHP) apresenta um rendimento elétrico inferior a 33% apesar de ter um rendimento térmico de 50%, mais elevado do que o do MCI.

A cadeia de captação de biogás e da sua valorização energética é ilustrada na figura 4.22.



**Figura 4.22** - Cadeia do biogás desde a sua extração até a inserção a rede elétrica.

Para se aferir a energia elétrica produzida é necessário calcular o Poder calorífico inferior (PCI) do metano numa base volúmica. Para tal, considerou-se:

- Massa molecular do  $\text{CH}_4 = 16\text{g/mol}$  (Deublein and Steinhäuser 2008);
- Volume molar de uma substância em estado gasoso em condições normais de pressão e temperatura (PTN) =  $22,4\text{ dm}^3$ ;
- Poder calorífico do metano =  $50\text{MJ/kg}$  (Da Silva 2014).

Com base os dados acima podemos calcular a relação de massa e volume do metano como espelha a equação 19.

$$\frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}(\text{metano}) = \frac{16\text{ g/mol}}{22,4\text{ dm}^3} = \frac{0,71\text{ g/mol}}{\text{dm}^3} = 0,71\text{kg/m}^3 \quad (19)$$

Com o resultado obtido na equação 19 podemos calcular a poder calorífico inferior por unidade de volume, na equação 20.

$$50\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \times 0,71\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{35,5\text{MJ}}{\text{m}^3} \quad (20)$$

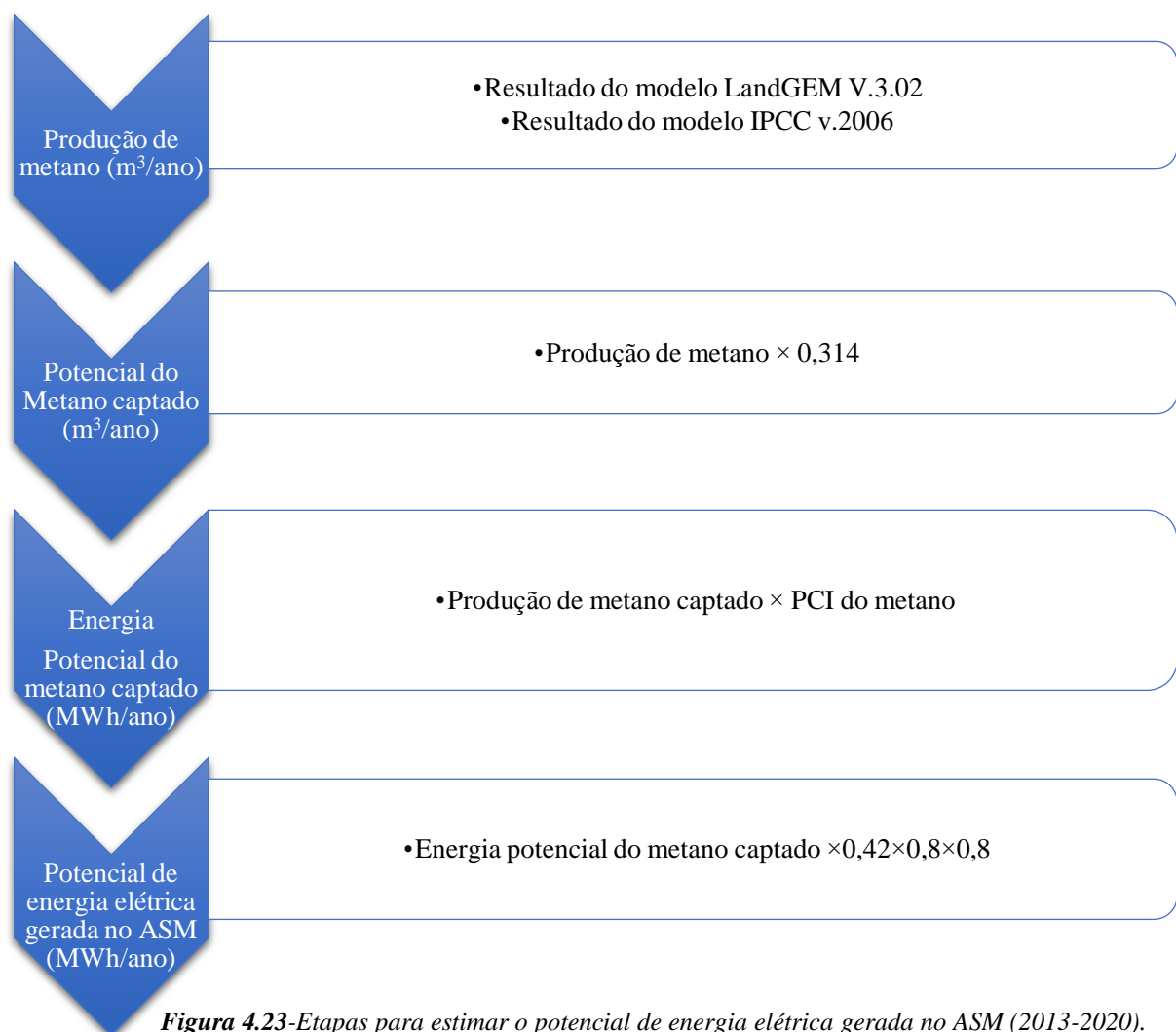
Finalmente, com o resultado obtido na equação 20 podemos converter de  $\text{MJ/m}^3$  em  $\text{MWh/m}^3$ , ou seja, calcular a energia por unidade de volume, como mostra a equação 21.

$$PCI = \frac{35,5}{3600} = \frac{0,00986MWh}{m^3} \quad (21)$$

Na aplicação do modelo tiveram-se também em conta as conclusões do estudo realizado por Candiani e Viana (2017), que indica que a eficiência de captação do biogás em aterro é de cerca de 75% e a eficiência de captação de metano em aterro sanitário situa-se num valor médio de 31,4%. Outros parâmetros a considerar nos cálculos são as horas de funcionamento do MCI e o seu rendimento energético em plena carga. Tendo dito isto, assumiu-se:

- Horas de funcionamento/ano= (80%);
- Rendimento do motor em plena carga= (80%).

Na figura 4.23 apresentam-se as etapas da metodologia utilizada para estimar o potencial de energia elétrica gerada no aterro sanitário dos Mulenvos.



**Figura 4.23-** Etapas para estimar o potencial de energia elétrica gerada no ASM (2013-2020).

## CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Este capítulo, tem por objetivo analisar os resultados obtidos com recurso aos modelos desenvolvidos na parte antecedente deste trabalho de investigação. Esta análise permitirá fazer uma comparação entre os dois modelos utilizados (LandGEM v.3.02 e IPCC v.2006) a nível da previsão da quantidade de metano que será possível captar anualmente no aterro sanitário dos Mulenvos, de modo a estimar o potencial de energia elétrica produzida a partir do mesmo.

### 5.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DEPOSITADOS NO ASM

Um dos parâmetros de extrema importância é a quantidade anual de RSU depositado em aterro, o que será avaliado para o caso do ASM, num cenário de 8 anos, isto é, desde 2013 até 2020.

Os dados que suportam esta análise foram recolhidos a partir de bases de dados eletrónicas de instituições como a Empresa Pública de Limpeza e Saneamento de Luanda (Elisal-Ep) num conjunto de séries temporais. Os valores de precipitação média global de Angola e da temperatura média neste território, no período em análise foram obtidos a partir das bases de dados da instituição Climate-Data Org.

A amostra de dados foi recolhida em séries temporais anuais abrangidas pelo período em análise. O principal critério de escolha do período de análise foi a sua proximidade com o momento presente, ou seja, seleccionou-se um período de análise onde a deposição de resíduo sólido é muito semelhante à atual e, portanto, reflete o potencial de valorização do gás de aterro no momento presente.

*Tabela 5.17 - Quantidade de RSU depositado no ASM (Elisal-EP, 2020).*

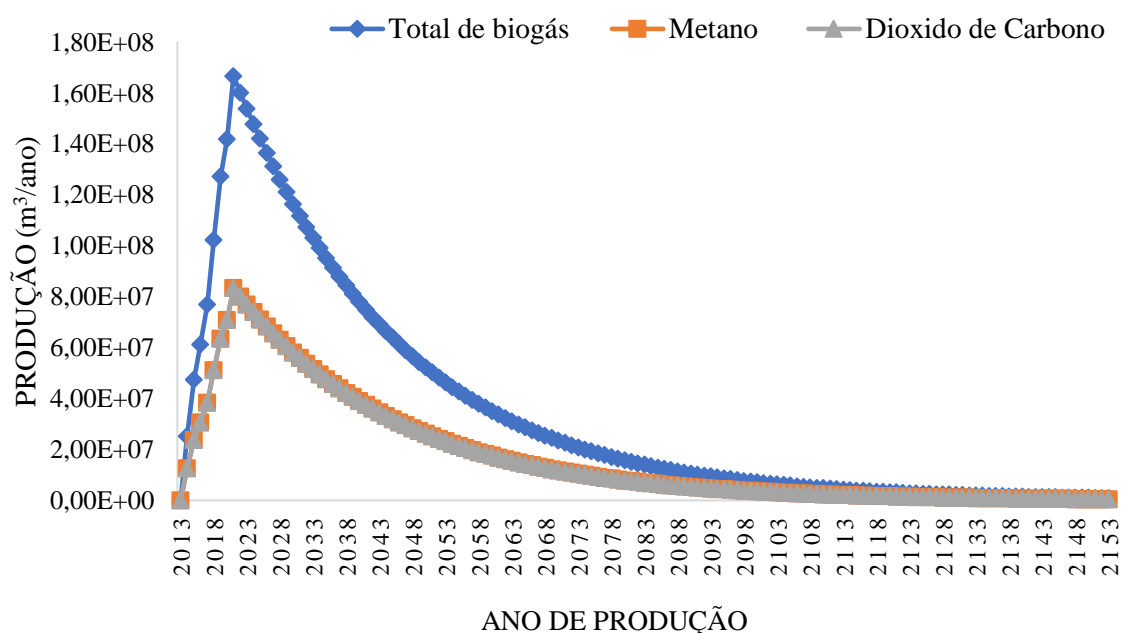
Ano	RSU (t/ano)
2013	2 074 733,90
2014	1 905 423,46
2015	1 283 906,57
2016	1 493 932,03
2017	2 335 908,50
2018	2 374 182,73
2019	1 623 322,85
2020	2 500 000,00

De acordo com os dados da tabela 5.17, é possível perceber que o aterro sanitário dos Mulenvos recebe enormes quantidades de resíduos sólidos urbanos, tendo em destaque o ano de 2020 com 2 500 000,00 t/ano. Em suma, esta quantidade RSU produzida na cidade de Luanda, pode ser aproveitada para produção de energia elétrica para inserção na RNT, de modo a mitigar a problemática dos RSU e a problemática energética da cidade capital. Também é possível verificar que existe uma significativa variabilidade na quantidade de resíduos depositada anualmente no ASM destacando-se por exemplo as flutuações observadas no período entre 2018 e 2020.

## 5.2 MODELO LandGEM

A previsão do potencial de captura de biogás no ASM, num período de 140 anos, considerando como ano inicial o ano 2013, foi avaliada pelo modelo LandGEM, tendo em conta a informação sobre a quantidade de RSU depositado no ASM apresentada na tabela 5.17 e os parâmetros selecionados para este modelo, conforme descrito na tabela 4.12.

As estimativas da produção e captura de biogás e de metano no ASM, no período de 2013 a 2053, apresentam-se na figura 5.24.



**Figura 5.24** - Previsão de biogás modelo LandGEM (m³/ano).



Relativamente à figura 5.24, podemos observar uma curva de crescimento exponencial dos caudais de metano e de dióxido de carbono desde 2013 até ao ano 2021, seguindo-se um período de um decaimento lento até ao ano 2053, que se pode considerar o limite do tempo de vida útil do aterro tendo em conta que corresponde já a concentrações muito baixas de emissão de biogás e consequentemente de metano. Este decréscimo da produção de biogás corresponde à diminuição progressiva da matéria orgânica biodegradável disponível no aterro. De referir que as curvas de produção de metano e de dióxido de carbono são proporcionais, visto que a concentração de metano presente no biogás foi considerada ser 50% e as concentrações de outros componentes foram omitidas por serem consideradas residuais.

A produção total do biogás prevista pelo modelo LandGEM, é obtida pelo somatório dos dois gases de maior representatividade ( $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ ), fazendo um total de 100%, o que como foi referido é uma simplificação da realidade, por ignorar os restantes componentes descritos na tabela 2.3.

O valor de  $k$ , sendo um parâmetro de extrema importância para o bom funcionamento do modelo, depende fundamentalmente dos seguintes fatores, nomeadamente (Lusk 1998):

- Teor de humidade contida na massa de resíduos;
- disponibilidade dos nutrientes para os microrganismos que efetuam a decomposição;
- pH;
- temperatura.

O valor de  $L_0$ , tem em conta a característica do aterro e a composição dos RSUs nele depositados, uma vez que, quanto maior for o seu valor, maior será o teor de materiais lenhocelulósicos contidos nos RSUs, ou seja maior será a fração biodegradável (Lusk 1998).

Na tabela 5.18 apresentam-se os valores numéricos dos caudais de metano, dióxido de carbono e biogás estimados pelo modelo LandGEM entre os anos de 2013 a 2020.

**Tabela 5.18 - Previsão do caudal de biogás produzido no ASM pelo modelo LandGEM (2013-2020).**

Ano de Produção	Produção (m³/ano)		
	Biogás	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>2013</b>	0	0	0
<b>2014</b>	25 195 326,39	12 597 663,19	12 597 663,19
<b>2015</b>	47 346 643,67	23 673 321,84	23 673 321,84
<b>2016</b>	61 081 766,79	30 540 883,4	30 540 883,4
<b>2017</b>	76 828 852,71	38 414 426,35	38 414 426,35
<b>2018</b>	102 183 350,6	51 091 675,28	51 091 675,28
<b>2019</b>	127 008 482,1	63 504 241,06	63 504 241,06
<b>2020</b>	141 741 851,6	70 870 925,78	70 870 925,78
Volume Total Acumulado (m³)	581 386 273,8	290 693 136,90	290 693 136,90

Ao observar a tabela acima descrita, é possível constatar que o valor máximo previsto para a produção anual de metano foi de 70 870 925,78 m³/ano, no ano 2020 e o valor mínimo foi de 12 597 663,19 m³/ano no ano de 2014. O volume acumulado de metano no período de 2013 a 2020 foi de 290 693 136,90 m³.

Assim sendo, como mostra na figura 4.22 podemos calcular a quantidade de gás metano que captado no aterro sanitário dos Mulenvos. Na tabela 5.19 apresenta-se a quantidade de gás metano captada no aterro, no período de 2013-2020, segundo o modelo LandGEM.

**Tabela 5.19** - Quantidade de metano que poderia ser captado no ASM em função do caudal de metano previsto pelo modelo LandGEM (2013-2020).

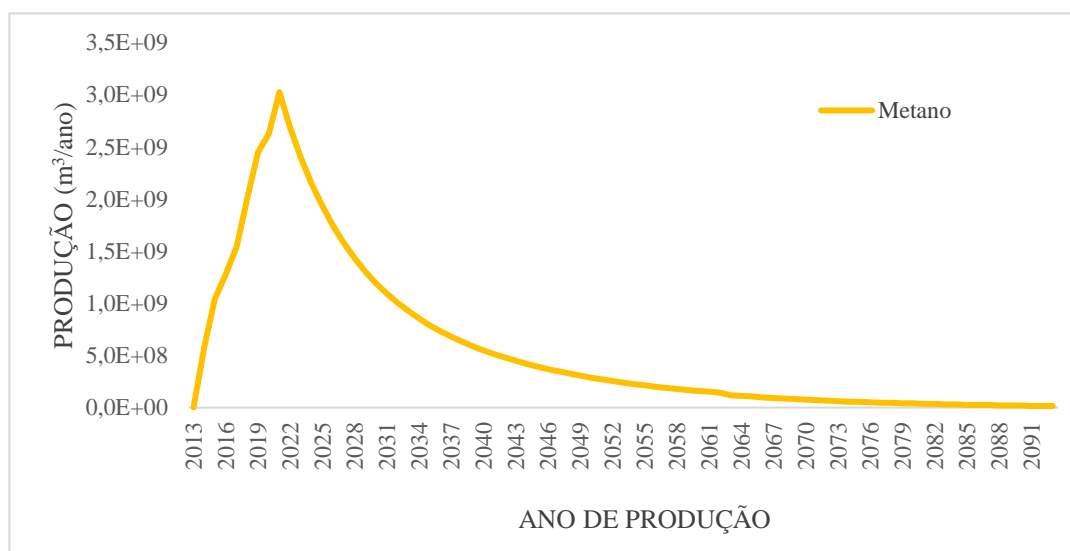
<b>Ano</b>	<b>Metano calculado pelo modelo LandGEM (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Potencial de captação de metano (m<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>2013</b>	0	0
<b>2014</b>	12 597 663,19	3 955 666,24
<b>2015</b>	23 673 321,84	7 433 423,05
<b>2016</b>	30 540 883,4	9 589 837,38
<b>2017</b>	38 414 426,35	12 062 129,88
<b>2018</b>	51 091 675,28	16 042 786,04
<b>2019</b>	63 504 241,06	19 940 331,69
<b>2020</b>	70 870 925,78	22 253 470,70
<b>Volume Total Acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	290 693 136,9	91 277 644,99

Olhando para a tabela 5.19, é possível constatar que o valor máximo da produção de metano seria de 22 253 470,70 m<sup>3</sup>/ano, no ano 2020 e o mínimo seria de 3 955 666,24 m<sup>3</sup>/ano no ano de 2014. O volume acumulado de metano que seria possível captar entre 2013 e 2020 foi 91 277 644,99 m<sup>3</sup>. Este volume de metano equivale, segundo a comparação energética apresentada na figura 2.4 a 104 969 291,70 litros de petróleo, o que constituiria uma poupança significativa deste recurso fóssil. Para Angola, esta substituição de petróleo por gás de aterro recuperado e valorizado energeticamente constituiria uma mais-valia, tendo em conta que contribuiria para reduzir a dependência do recurso natural (petróleo), e para diversificar as matérias-primas utilizadas na produção de energia o que aumenta a robustez do sector energético. Esta alteração tem ainda impactos positivos a nível social, económico e ambiental pelo que também melhora a sustentabilidade deste setor.

### 5.3 MODELO IPCC

Com o intuito de se obter a curva de produção de metano pelo modelo IPCC, foram utilizados os valores de  $k$ , descritos na tabela 4.14. Neste sentido, os valores do modelo variam tendo em conta a categoria de resíduos, a sua biodegradabilidade, as características da zona climática onde se insere o aterro. Para a obtenção do valor de FCM teve-se em consideração a configuração específica do aterro sanitário dos Mulenvos. No que respeita ao  $COD_f$  e  $COD_T$ , foram adotados valores seleccionados com base nas diretrizes do IPCC.

Importa salientar que um parâmetro de extrema importância é a composição típica dos RSUs no modelo em questão. Desta feita, a figura 5.25 mostra-nos a curva de produção de metano ao longo de 78 anos.



**Figura 5.25** - Previsão de Metano modelo IPCC ( $m^3/ano$ ).

De acordo com a figura 5.25, a aplicação do modelo IPCC v.2006, origina uma curva do caudal de gás metano, diferente do resultado obtido com o modelo LandGEM que apresentava duas curvas concretamente ( $CH_4$  e  $CO_2$ ). No entanto tendo em conta que no modelo IPCC, a concentração de metano presente no biogás também é assumida como sendo 50%, e se for também assumida uma composição simplificada do biogás como uma mistura binária de  $CH_4$  e  $CO_2$ , pode-se admitir que existirá uma curva equivalente de  $CO_2$  com um caudal idêntico ao do metano.

O modelo IPCC como já foi dito, obtém os resultados da produção do metano em giga grama, pelo que para calcular o caudal em  $m^3/ano$  foi feita a conversão em quilograma, e estimou-se o volume correspondente utilizando para a densidade do gás metano o valor de  $0,667 \text{ kg/m}^3$ , valor este que é utilizado e

recomendado pelo modelo LandGEM. Com base nestes valores é-nos permitido calcular o caudal de gás metano produzido, como podemos observar na tabela 5.20.

**Tabela 5.20** - Previsão do caudal de gás metano produzido no ASM pelo modelo IPCC (2013-2020).

<b>Ano</b>	<b>Metano (Gg)</b>	<b>Metano (kg)</b>	<b>Caudal de Metano (m³/ano)</b>
<b>2013</b>	0,00	0,00	0,00
<b>2014</b>	386,55	386 549 902,69	579 535 086,49
<b>2015</b>	694,81	694 808 615,04	1 041 692 076,53
<b>2016</b>	851,15	851 154 560,43	1 276 093 793,75
<b>2017</b>	1 029,69	1 029 689 618,40	1 543 762 546,33
<b>2018</b>	1 345,73	1 345 732 468,74	2 017 589 908,15
<b>2019</b>	1 633,21	1 633 214 113,19	2 448 596 871,35
<b>2020</b>	1 749,24	1 749 244 538,69	2 622 555 530,27
<b>Volume Total Acumulado (m³)</b>	7 690,39	7 690 393 817,18	11 529 825 812,87

A metodologia adotada para prever a produção de metano durante os anos de 2013 a 2020, estimou um potencial máximo de produção de metano de 2 622 555 530,27 m³/ano, no ano de 2020, e um mínimo de 579 535 086,49 m³/ano no ano de 2014. O total acumulado de volume de metano seria de 11 529 825 812,87 m³, segundo este modelo.

Na tabela 5.21 compara-se a quantidade de gás metano que poderia ser captado no ASM entre 2013 e 2020, com o caudal de metano gerado neste aterro de acordo com o modelo IPCC para o mesmo período de tempo.

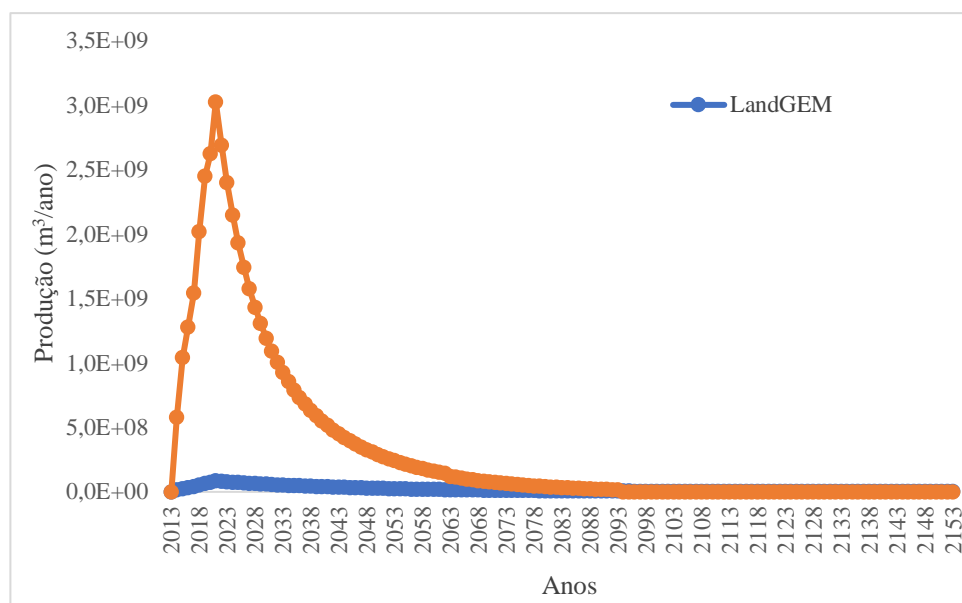
*Tabela 5.21 - Quantidade de metano que poderia ser captado no ASM em função do caudal de metano previsto pelo modelo IPCC (2013-2020).*

<b>Ano</b>	<b>Metano calculado (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Potencial de captação de no ASM (m<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>2013</b>	0,00	0,00
<b>2014</b>	579 535 086,49	181 974 017,16
<b>2015</b>	1 041 692 076,53	327 091 312,03
<b>2016</b>	1 276 093 793,75	400 693 451,24
<b>2017</b>	1 543 762 546,33	484 741 439,55
<b>2018</b>	2 017 589 908,15	633 523 231,16
<b>2019</b>	2 448 596 871,35	768 859 417,60
<b>2020</b>	2 622 555 530,27	823 482 436,51
<b>Volume Total Acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	11 529 825 812,87	3 620 365 305,24

Ao observar a tabela acima descrita, é possível constatar que o valor máximo da produção de metano foi estimado em 823 482 436,51 m<sup>3</sup>/ano, no ano 2020 e o mínimo seria de 181 974 017,16 m<sup>3</sup>/ano no ano de 2014. O que nos remete um acumulado do caudal de metano de 3 620 365 305,24 m<sup>3</sup>/ano, correspondendo este resultado segundo a comparação energética supracitada, à poupança de 4163420101 litros de petróleo. Seguindo desta forma os resultados obtidos com o modelo IPCC, a mesma direção que o modelo LandGEM v.3.v.02, no que se refere às enormes vantagens que Angola teria com esta diversificação da matriz energética.

#### **5.4 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE METANO DE ATERRO (LANDGEM E IPCC)**

Para fazermos a previsão da produção de gás metano do aterro sanitário dos Mulenvos tivemos que recorrer a dois modelos de previsão de biogás de aterro de primeira ordem concretamente (LandGEM e IPCC). Com a adoção dos dois modelos, a comparação entre eles tornou-se imperativa, o que resultou na necessidade de se avaliar o melhor cenário na determinação do potencial de gás metano no ASM. Deste modo é possível observar na figura 5.26 a produção anual do caudal de metano entre os dois modelos.



**Figura 5.26** - Comparação de previsão de gás metano entre os modelos LandGEM e IPCC.

A figura 5.26, permite evidenciar as diferenças entre os dois modelos testados, e as respetivas estimativas da produção de metano. Ambos os modelos preveem o pico de produção de metano para o ano 2021, mas enquanto o modelo LandGEM estima um valor de 83 271 891 m³/ano, para o caudal de metano em 2021, o modelo IPCC sugere um valor bastante superior de 3 025 956 113 m³/ano.

Após o alcance do pico da produção de metano nos dois modelos, há um declínio perceptível na produção de gás metano, como consequência da redução progressiva da matéria orgânica biodegradável, disponível para a sua produção. Por sinal, este cenário regista-se um ano depois do período em análise, nomeadamente em 2021. Fato esse confirmado por Bianek et al., (2017) que afirmam que os aterros registam maior produção de gás metano no ano de encerramento.

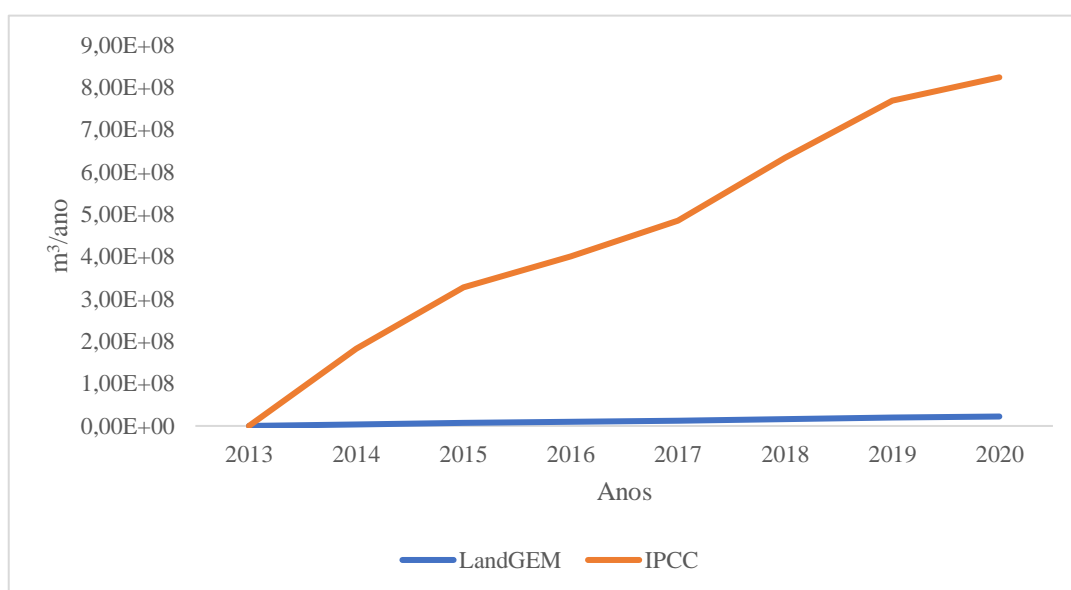
No entanto, os dois modelos utilizados preveem a produção de metano em períodos diferentes, sendo que, o modelo LandGEM prevê a produção de metano para 140 anos (que representa o período de vida útil do aterro segundo as diretrizes do modelo LandGEM), e o modelo IPCC prevê para 78 anos (que representa o período de vida útil do aterro segundo as diretrizes do IPCC). Não obstante ter feito a previsão de gás metano em menos tempo de vida útil, comparado ao modelo LandGEM, o modelo IPCC apresenta melhores resultados.

As diferenças registadas nos resultados obtidos com os dois modelos podem ser fundamentadas pela existência de parâmetros diferentes entre os dois modelos e da sua influência decisiva nos resultados produzidos.

Uma das grandes desvantagens do modelo LandGEM, é o facto de não considerar as diferenças na composição típica dos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro, mas sim assumir uma composição

média que pode ser bastante diferente da composição real. Assim, o modelo LandGEM poderá ser utilizado, em locais onde não existem dados de caracterização dos resíduos depositados, que possam suportar a aplicação de outros modelos mais pormenorizados (Scharff; Jacobs, 2006).

Na figura 5.26 compara-se os valores do caudal de metano que seria possível captar no período de 2013 a 2020, de acordo com as estimativas dos dois modelos utilizados. Segundo o modelo IPCC, o valor máximo de caudal de metano captado foi de 823 482 436,51 m<sup>3</sup>/ano em 2020, enquanto segundo o modelo LandGEM este valor máximo do caudal de metano captado seria de 22 253 470,70 m<sup>3</sup>/ano no ano em questão. Esta comparação apresenta-se graficamente na figura 5.27.



**Figura 5.27** - Comparação do metano que poderia ser captado para os anos em estudo (LandGEM e IPCC).

Considerando que ambos são modelos de primeira ordem e têm alguns parâmetros de entrada semelhantes, obtivemos resultados completamente diferentes concernente ao caudal máximo de metano para cada modelo de previsão, destacando o modelo IPCC. Os resultados obtidos indicam que a elevada fração orgânica dos resíduos depositados no ASM justifica o baixo desempenho do modelo LandGEM que ao assumir uma composição média com menor fração biodegradável subestima de forma muito significativa o potencial de produção de metano deste aterro. Olhando para figura 5.27, percebe-se que ambos modelos de previsão consideram que, apenas haverá produção de metano um ano após a deposição do resíduo no aterro. Assim sendo, podemos constatar que o auge de produção do gás metano acontecerá, naturalmente, quando a quantidade máxima de resíduo estiver depositada no aterro e quando a sua selagem favorece as condições anaeróbias. O que consequentemente nos conduz a afirmação de que a quantidade de resíduos sólidos urbanos é diretamente proporcional à quantidade de gás metano produzido.



## 5.5 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA EM FUNÇÃO DO CAUDAL DE METANO CAPTADO PARA OS MODELOS LandGEM e IPCC

Com fundamento nos modelos utilizados para fazer a previsão de gás metano contido no biogás de aterro, será possível aferir o potencial de energia elétrica do gás metano proveniente do aterro sanitário dos Mulenvos. No entanto, o balanço energético depende extremamente da quantidade de gás metano obtido pelos modelos de previsão LandGEM e IPCC. Assim sendo, é imperativa admissão das quantidades anuais de forma a termos um melhor esclarecimento de cada cenário.

Baseando-se na metodologia aplicada no presente trabalho, é importante saber que o poder calorífico inferior do metano é de 0,00986 MWh/m<sup>3</sup> apurado através da equação 21, a eficiência elétrica do motor de combustão interna a gás (MCI) é de 42% e eficiência térmica de 43% como referenciado na tabela 4.16, de seguida foi considerado a figura 4.22. Com a finalidade de converter a energia química contida no metano previsto, em energia mecânica, de forma a ligar o gerador que converte a energia mecânica em energia elétrica, foi escolhido o motor de combustão interna, por proporcionar maior eficiência elétrica pese embora perca em termos de eficiência térmica quando comparado com a turbina a gás. com estes pressupostos, obteve-se um total de energia elétrica acumulada de 241 919,35 MWh/ano, relativamente ao período de 2013 a 2020. Na tabela 5.22 podemos observar os resultados dos cálculos do potencial de energia elétrica gerada em função do caudal anual de metano obtido pelo modelo LandGEM.

*Tabela 5.22 - Potencial de Energia Elétrica gerada pelo modelo LandGEM (2013-2020).*

Ano	Metano captado (m <sup>3</sup> /ano)	Potência (MW)	Energia Elétrica (MWh)
2013	0	0,00	0,00
2014	3 955 666,24	1,20	10 483,97
2015	7 433 423,06	2,20	19 701,31
2016	9 589 837,39	2,90	25 416,60
2017	12 062 129,88	3,60	31 969,08
2018	16 042 786,04	4,90	42 519,29
2019	19 940 331,69	6,00	52 849,22
2020	22 253 470,70	6,70	58 979,89
<b>Total acumulado</b>	91 277 644,99	27,62	241 919,35

Relativamente à tabela 5.22, constata-se que a potência elétrica máxima prevista no aterro sanitário dos Mulenvos é de 6,70 MW, e a energia elétrica gerada corresponde a 58 979,89 MWh/ano registada no ano 2020. Estes valores representam um total acumulado de potência elétrica de 27,62 MW, e um total acumulado de energia elétrica gerada de 241 919,35 MWh.

Com a aplicação da mesma metodologia utilizada no modelo LandGEM, podemos obter resultados de potência e energia elétrica gerada a partir do metano captado no aterro sanitário dos Mulenvos, segundo a estimativa do modelo IPCC, obtendo-se um total acumulado de 9 595 300,35 MWh para o período de 2013 a 2020. Na Tabela 5.23 é possível observar os resultados do potencial de energia elétrica gerada a partir do gás metano captado segundo o modelo IPCC.

*Tabela 5.23 - Potencial de Energia Elétrica gerada pelo modelo IPCC (2013-2020).*

<b>Ano</b>	<b>Metano captado (m3/ano)</b>	<b>Potência (MW)</b>	<b>Energia Elétrica (MWh/ano)</b>
<b>2013</b>	0,00	0,00	0,00
<b>2014</b>	181 974 017,16	55,06	482 298,11
<b>2015</b>	327 091 312,03	98,96	866 912,35
<b>2016</b>	400 693 451,24	121,23	1 061 985,10
<b>2017</b>	484 741 439,55	146,66	1 284 743,20
<b>2018</b>	633 523 231,16	191,67	1 679 069,70
<b>2019</b>	768 859 417,60	232,62	2 037 760,40
<b>2020</b>	823 482 436,51	249,15	2 182 531,50
<b>Total acumulado</b>	3 620 365 305,24	1 095,35	9 595 300,35

Observando na tabela 5.23, consta-se que a potência elétrica máxima prevista no aterro sanitário dos Mulenvos é de 249,15 MW, a que corresponde um valor máximo de energia elétrica gerada de 2 182 531,50 MWh/ano, valores registados no ano 2020. O total acumulado de potência elétrica de 1 095,35 MW, e o total acumulado de energia elétrica gerada é de 9 595 300,35 MWh para o período de 2013 a 2020.

## 5.6 ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE METANO, OBTIDO ENTRE OS DOIS MODELOS LANDGEM E IPCC NO ASM

Tal como podemos confirmar na tabela 5.24, o modelo IPCC apresenta um cenário mais otimista, estimando um total de potência elétrica disponível de 1 095,35 MW, e uma potência máxima de 249,15 MW correspondente ao ano de 2020, e consequentemente a energia elétrica gerada de 2 182 531,50 MWh/ano. Já o modelo LandGEM apresenta resultados mais conservadores, estimando um total de potência elétrica útil de 27,62 MW, e atingindo o máximo de potência elétrica de 6,70 MW relativamente o ano de 2020 e consequentemente a energia elétrica gerada de 58 979,89 MWh/ano.

**Tabela 5.24** - Análise comparativa da estimativa do potencial energético de gás metano, obtida entre os modelos LandGEM v3.02 e IPCC v.2006 no ASM (2013-2020).

ANO	Modelo LandGEM			Modelo IPCC		
	Metano Captado (m³/ano)	Potência (MW)	Energia Elétrica (MWh/ano)	Metano Captado (m³/ano)	Potência (MW)	Energia Elétrica (MWh/ano)
<b>2013</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00
<b>2014</b>	3 955 666,24	1,20	10 483,97	181 974 017,16	55,06	482 298,11
<b>2015</b>	7 433 423,05	2,20	19 701,31	327 091 312,03	98,96	866 912,35
<b>2016</b>	9 589 837,38	2,90	25 416,60	400 693 451,24	121,23	1 061 985,10
<b>2017</b>	12 062 129,88	3,60	31 969,08	484 741 439,55	146,66	1 284 743,20
<b>2018</b>	16 042 786,04	4,90	42 519,29	633 523 231,16	191,67	1 679 069,70
<b>2019</b>	19 940 331,69	6,00	52 849,22	768 859 417,60	232,62	2 037 760,40
<b>2020</b>	22 253 470,70	6,70	58 979,89	823 482 436,51	249,15	2 182 531,50
<b>Total</b>	91 277 644,99	27,62	241 919,35	3 620 365 305,24	1 095,35	9 595 300,35

Portanto, os dados apresentados na tabela 5.24, percebe-se a evolução anual do potencial energético do aterro sanitário dos Mulenvos, de acordo com os modelos utilizados. Desta forma, podemos dizer que o aterro sanitário dos Mulenvos apresenta um bom potencial de implementação de um projeto de aproveitamento do biogás de aterro visando principalmente a produção de energia elétrica para inserção na rede nacional de transporte de eletricidade de Angola.

Importa considerar o fato que a produção de biogás ao longo do tempo é inconstante devido a diversos fatores, incluindo os externos como por exemplo a temperatura e pluviosidade, e os internos como as condições de anaeróbios, a temperatura interna das células do aterro e a disponibilidade de matéria orgânica biodegradável nas várias regiões do aterro. O que nos remete ao estudo feito por Scharff; Jacobs, (2006), que efetuou uma avaliação a três aterros holandeses, tendo verificado que os modelos de previsão apresentam valores muito elevados quando comparados à produção real do aterro, destacando o modelo LandGEM que apresentou os valores mais elevados. Já no estudo feito por Bianek et al., (2017), que fizeram a comparação entre os dois modelos em questão (LandGEM e IPCC), identificam o modelo IPCC como modelo que apresentou os resultados mais elevados. Apesar destas limitações os modelos de previsão permitem suportar estudos de viabilidade de projeto de valorização energética do biogás de aterro desde que se tenha em conta esta possível incerteza nas estimativas produzidas.

Tendo em conta os resultados obtidos na tabela 5.24, que evidenciam a estimativa do potencial energético de metano dos modelos LandGEM e IPCC, pode-se afirmar que o modelo IPCC apresenta melhores resultados em relação ao LandGEM, mas ambos os modelos sugerem que esta valorização energética é possível e seria benéfica do ponto de vista ambiental e do ponto de vista da diversificação energética. Os valores elevados obtidos para a produção de metano podem estar relacionados com o fato dos parâmetros recomendados na sua simulação, corresponderem à conjuntura europeia e norte americana, o que pode levar a uma superestimação de valores, mas mesmo considerando apenas uma fração da produtividade de biogás estimada as quantidades calculadas suportam um projeto de investimento na valorização energética deste recurso renovável.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O trabalho desenvolvido, foi demonstrado um enquadramento teórico sobre a produção de biogás de aterro sanitário, onde se verificou que é possível fazer a valorização de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros em energia elétrica, fazendo desta uma energia limpa.

Relativamente ao estudo empírico, foram utilizados dois modelos, nomeadamente LandGEM v.3.02 e IPCC v.2006, para a previsão da produção do gás metano no aterro sanitário dos Mulenvos, de forma a fazer o seu aproveitamento energético. Deste modo, verificou-se que o potencial energético dos RSU de Luanda é suficiente para suportar a implementação de um projeto de recuperação e valorização de biogás de aterro, destacando-se o modelo IPCC v.2006 por apresentar ao longo dos 8 anos em estudo melhores resultados de caudal de metano. De salientar que este é o modelo mais complexo quando comparado com o LandGEM, por envolver parâmetros como: a composição típica dos RSUs, Fração de Carbono Orgânico Degradável, fator de correção do metano, fator de oxidação e o clima. De forma produzir resultados mais confiáveis devem ser realizados trabalhos de campo que incluam medições da concentração de metano disponível em diferentes pontos de amostragem do aterro.

Os resultados obtidos remetem-nos, para a avaliação do desperdício de um recurso energético, que vem sendo feito no aterro sanitário dos Mulenvos, e que além de não se traduzir num aproveitamento energético prejudica significativamente o ambiente da cidade de Luanda e é uma fonte de emissões significativas de GEE com impacto negativo global. Assim sendo, a implementação de um projeto de produção energética, resolveria a problemática do RSU da cidade de Luanda, com a vantagem de poder passar a fornecer energia elétrica a uma quantidade relevante de habitações desta cidade. E por sinal essa fonte de energia renovável seria uma alternativa mais sustentável, pois aceleraria a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência do petróleo.

A produção de caudal de metano obtido nos modelos é bastante significativa devido à quantidade de RSU que é produzido na cidade de Luanda, uma vez que se tomam em conta os hábitos e costumes da população em causa e visto que o ASM é o único aterro da cidade. A produção de metano tem a vantagem de acelerar a decomposição da fração orgânica depositada em aterro e assim reduzir o volume ocupado, aumentando o seu tempo de vida útil.

Apesar de haver uma grande disparidade nos resultados obtidos com os dois modelos utilizados, os modelos de previsão de primeira ordem continuam sendo ferramentas bastante utilizadas nas entidades gestoras de aterros sanitários, de modo a planear a gestão de gases produzidos em aterros de forma eficiente.

No que respeita às limitações, na efetivação do presente trabalho, foi demonstrado algumas dificuldades em adquirir informações necessárias para aferir a viabilidade económica do aterro, que, por conseguinte,

daria suporte na pretensão da empresa responsável pela gestão de implementar um projeto de valorização energética.

Outrossim, os dados em séries temporais de apenas 8 anos constituíram limitações, pelo facto da empresa responsável pela gestão do ASM, não dispor de registos anteriores aos anos abrangidos pelo trabalho.

Relativamente às recomendações, sugere-se a quem for realizar um estudo voltado para a vertente abordada no presente trabalho, que tenha atenção na medição real do caudal de biogás e da concentração de metano, ao longo dos anos em estudo, de modo a obter valores mais rigorosos para então avaliar o grau de confiabilidade dos modelos de previsão utilizados.

Por fim, visto que os modelos utilizados no presente trabalho não são os únicos existentes, em estudos futuros recomenda-se a possibilidade de recorrer a outros modelos de previsão, visando a comparação dos resultados obtidos neste trabalho. Isso permitiria uma análise mais abrangente de qual o modelo de previsão de biogás que seria ideal o aterro sanitário dos Mulenvos.

## CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Coordination, Pôle National de (2012) "Methode D'elaboration Des Inventaires Territoriaux Des Emissions Atmospheriques".
- Alexander, Amy; Burklin, Clint; Singleton, Amanda (2005) "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide" p.56, Clean Air Technology Center. North Carolina.
- Ayu, Audra; Aryati, Vincensia Dyan (2010) "Biogas production using anaerobic biodigester from cassava starch effluent with ruminant bacteria as biocatalyst". Thesis to Obtain the Bachelor of Engineering, for the Universitas Diponegoro Semarang, p. 55.
- Bianek, J.; Schirmer, W. N.; Cabral, A. R.; et al (2017). "Comparação Entre Metodologias Usepa E Ipcc Para Estimativa Teórica de Produção De Biogás Em Aterro Municipal". Biofix Sci J 3:34..
- Borba, S. M. P. (2006) "Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários". Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Cabeças, A. J (2005) "Aterro Sanitário - Resíduos Sólidos Urbanos - Enquadramento, Conceitos Gerais e Bases de Projecto". Dissertação de Mestrado da Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Candiani G.; Viana E. (2017) "Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários". GEOUSP Espaço e Tempo ( online), Vol..21 (3); p. 845-857. Iss 2179-0892.
- Da Silva F. C. N. P. (2014) "Avaliação do Potencial da Produção de Energia Elétrica Através de Resíduos Urbanos em Portugal Continental Horizonte Temporal 2014-2020". Dissertação de Mestrado da Universidade Nova de Lisboa- Faculdade de Ciência e Tecnologia.
- Da Silva N. F, Schoeler GP, Lourenço VA, et al (2020) "First order models to estimate methane generation in landfill: A case study in south Brazil". Journal of Environmental Chemical Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104053>
- Deloitte (2020) "Banca em Análise O papel da banca na recuperação de Angola". disponível em <https://www2.deloitte.com/ao/pt/pages/financial-services/topics/banca-em-analise-20201.html>, acedido em 15/11/2020.
- Deublein D, Steinhäuser A (2008). "Biogas from Waste and Renewable Resources". British Library, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim All.
- Drive, Roger Bacon. Reston, Virginia (1997). "Comparison Of Models For Predicting Landfill Methane Recovery". 94306; p.1–102, California.
- Fernandes JG (2009). "Estudo da Emissão de Biogás em Aterro Sanitário Experimental". Trabalho de Conclusão de Pós Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais. p. 116.
- Freire, R. M. de M.; Cordeiro, J. de O.; Magalhães, T. F.; Santo, A. A. B. (2017). "Análise comparativa e exergética de geração de energia elétrica por meio de motores de combustão interna utilizando diesel , gás natural ou gás de síntese". 13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica. Lisboa- Portugal
- Imperial, J. M. de (1980). "Bombas de Injecção Diesel" . 06ª Ed. Edições Cetop, Lisboa.
- IPCC (2006). "IPCC Waste Model". Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Kamalan, Hamidreza (2016). "A New Empirical Model to Estimate Landfill Gas Pollution". J. Health Sci. Surveill. Syste, Vol. 4(3); p.142–148.
- Kamalan, H.; Sabour, M.; Shariatmadari, N. (2011). "A review on available landfill gas models". J.

- Environ Sci. Technol, Vol. 4(2); p.79–92. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.79.92>
- Kumar, A.; Sharma, M. P. (2013). "Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 5; p.50–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2013.11.004>
- Lusk, P. (1998). "Methane Recovery from Animal Manures The Current Opportunities Casebook". Midwest Research Institute for U. S. Department of Energy. p.150
- Manfredi, S. (2009). "Environmental Assessment of Solid Waste Landfilling in a Life Cycle Perspective (LCA model EASEWASTE)" PhD Thesis of Technical University of Denmark.
- Matheri, A. N.; Ndiweni, S. N.; Belaid, M. et al (2017). "Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste". *Renew Sustain Energy Rev*, Vol.80; p.756–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.068>
- Minfin Ministério das Finanças (2020) Orçamento Geral do Estado. Disponível em <https://www.minfin.gov.ao/PortalMinfin/#/>, acedido em 15/11/2020.
- Moran MJ, Shapiro HN (2006) *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th edn. Library, British, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim All, West Sussex.
- Moreira, F. F. (2010). "Estudo do Potencial Energético de Aproveitamento do Biogás Gerado no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia". Monografia de Licenciatura da Universidade Federal de Ceará.
- Moya, D.; Aldás, C.; López, G.; Kaparaju, P. (2017). "Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: A worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies". *Energy Procedia*, vol.134; p.286–295. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.618>
- MWM (2020) "Energy. Efficiency. Environment". Available in <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/gas-engines-power-generators/gas-engine-tcg-2032/>. Accessed 8 Aug 2020.
- Necker, H. S.; Rosa, A. L. D. da (2014). "Estimativa Teórica Da Geração De Biogás do Futuro Aterro Sanitário De Ji-Paraná - Ro". *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, vol.17; p.3416–3424.
- Oonk, H. (2010). "Literature review: methane from landfills. Sustain Landfill Foundation (Methods to quantify generation, oxidation and emission). Final Report for Sustainable Landfill Foudation. p. 75. (<https://www.afvalzorg.nl/content/uploads/2018/03/Methane-from-landfill-Methods-to-quantify-generation-oxidation-and-emission.pdf>, acedido em 30 de Maio de 2021).
- Planeamento, M. da E e (2020). *Estratégia de Formalização e Fomento do Mercado de Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos. Estudo de caso aplicado a Luanda*. p.1-66. mep.gov.ao.
- Russo, M. A. T. (2003). "Tratamento de Resíduos Sólidos". Relatório da Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. p.1–196
- Santagelo, V. S.; Oliveira, D. M. de; Dias, V. C. F.; Jr. Armando, D. de C. (2012). "Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Timbó/SC". 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. p. 35. Florianópolis.
- Scharff, H.; Jacobs, J. (2006). "Applying guidance for methane emission estimation for landfills". *Waste Management*, Vol. 26(4); p. 417-429. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.015>
- Santos, M. M.; Romanel, C.; van Elk, A. G. H. P. (2017). "Análise da eficiência de modelos de decaimento de primeira ordem na previsão da emissão de gás de efeito estufa em aterros sanitários brasileiros". *Eng Sanit e Ambient*, Vol. 22 (6); p.1151–1162.



- Sekoai, P. T.; Ouma, C. N. M.; du Preez, S. P. et. al (2019). "Application of nanoparticles in biofuels: An overview". Vol. 237; p. 380–397.
- Silva, T. F. da; Freitas, I. R. (2019). "Potencial Energético De Resíduos Sólidos Urbanos Por Diferentes Modelos Técnicos de Previsão". no XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em iniciação científica. p. 329–335. São Paulo: Blucher.
- Surra, E.; Bernardo, M.; Lapa, N.; et.al (2018). "Maize cob waste pre-treatments to enhance biogas production through co-anaerobic digestion with OFMSW". Waste Manag, Vol. 72; p.193–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.004>
- Tchobanoglous, George; Kreith, Frank (2012). "Handboook of Solid Waste Management". 2 ed, McGRAW-HILL.
- Themelis, N. J.; Ulloa, P. A. (2007). "Methane generation in landfills". Renewable Energy, Vol. 32(7); p.1243–1257. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>
- USEPA (2004). "Air toxics and risk assessment". Vol. 1; p. 662. Available in <https://www.epa.gov/fera/air-toxics-risk-assessment-reference-library-volumes-1-3>, accessed 19 Dec 2020.

## 8. ANEXOS

### 8.1 ANEXO A

